ВЕСТНИК ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Т. 19, № 1

Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
январь-март 2019 г.

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006
DOI: 10.23947/1992-5980

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

01.02.01 – Теоретическая механика (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)
01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)
05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
05.02.04 – Трение и износ в машинах (технические науки)
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки)
05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
05.13.17 – Теоретические основы информатики (технические науки)
05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки)

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ),
а также в международной базе EBSCO
Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 35578

Над номером работали:
И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 28.03.2019., дата выхода в свет 30.03.2019.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать цифровая. Усл. печ. л. 22,6.
Тираж 1000 экз. Заказ № 28/03 Цена свободная.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372.
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik.donstu.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 4–12. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 1, pp. 4–12. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 519.6 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-4-12

Исследование стационарных решений задачи динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния *

Ю. В. Белова[1], А. М. Атаян[2], А. Е. Чистяков[3], А. В. Стражко[4]**
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

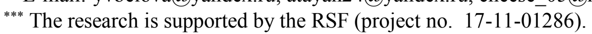
Study on stationary solutions to the problem of phytoplankton dynamics considering transformation of phosphorus, nitrogen and silicon compounds***

Yu.V. Belova[1], A.M. Atayan[2], A.E. Chistyakov[3], A.V. Strazhko[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Работа посвящена исследованию решения задачи трансформации форм фосфора, азота и кремния. Данная проблема возникает при моделировании динамики фитопланктона в мелководных водоемах, в том числе в Азовском море. Модель динамики фитопланктона сформулирована как краевая задача для системы уравнений диффузии-конвекции-реакции и учитывает поглощение и выделение питательных веществ фитопланктоном, а также переход питательных веществ из одного соединения в другое. Для расчета начальных условий и параметров уравнений, при которых наступает стационарный режим, разработано программное обеспечение, основой которого послужила модель, описывающая изменения концентраций фитопланктона без учета влияния течений. Данная модель представлена системой неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений. На основе разработанного программного обеспечения экспериментальным образом рассчитаны начальные условия и параметры модели динамики фитопланктона в Азовском море.
Материалы и методы. Рассматривается трехмерная модель динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния, основанная на системе уравнений транспорта биогенных веществ. Для уточнения параметров модели, при которых наступают стационарные режимы, рассматривается случай пространственно-однородного распределения субстанций. В результате упрощения получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решена методом Рунге-Кутты.
Результаты исследования. Разработано программное обеспечение для уточнения начальных условий и параметров модели динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния. Проведены несколько численных экспериментов в предположении, что развитие фитопланктона лимитируется единственным биогенным веществом. В результате вычисли-

Introduction. The solution to the problem of transformation of phosphorus, nitrogen and silicon forms is studied. This problem arises under modeling phytoplankton dynamics in shallow-water bodies including the Azov Sea. The phytoplankton dynamics model is formulated as a boundary value problem for the system of diffusion-convection-response equations and takes into account the absorption and release of nutrients by phytoplankton, as well as the transition of nutrients from one compound to another. To calculate the initial conditions and parameters of the equations under which the steady-state regime occurs, the software is developed, which is based on the model describing changes in phytoplankton concentrations without considering current effects. This model is represented by a system of inhomogeneous differential equations. Based on the developed software, the initial conditions and parameters of the phytoplankton dynamics model in the Azov Sea are calculated experimentally.
Materials and Methods. A 3D model of phytoplankton dynamics is considered taking into account the transformation of phosphorus, nitrogen and silicon compounds based on the system of nutrient transport equations. The case of a spatially uniform distribution of substances is considered to specify the parameters of the model at which the stationary modes occur. Because of simplification, a system of ordinary differential equations solved through the Runge-Kutta method is obtained.
Research Results. The software is developed to specify the initial conditions and parameters of the phytoplankton dynamics model considering the transformation of phosphorus, nitrogen and silicon compounds.
Several numerical experiments are performed under the assumption that the development of phytoplankton is limited by a single biogenic substance. As a result of the computational experiment, it can be seen that with the obtained values of the





* Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 17-11-01286).
** E-mail: yvbelova@yandex.ru, atayan24@yandex.ru, cheese_05@mail.ru, strajcko2@gmail.com
*** The research is supported by the RSF (project no. 17-11-01286).

тельного эксперимента видно, что при полученных значениях начальных концентраций и параметров уравнений наступают стационарные режимы для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей случай пространственно-равномерного распределения субстанций.
Обсуждение и заключения. В работе исследована математическая модель трансформации форм фосфора, азота и кремния в задаче динамики фитопланктона.
Получены стационарные режимы для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, для которых определены значения параметров системы и начальные условия. Полученные результаты могут быть использованы в процессе дальнейшего моделирования динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния с учетом конвекции-диффузии, солености, температуры.

initial concentrations and parameters of the equations, stationary modes occur for the system of ordinary differential equations describing the case of the spatially uniform distribution of substances.
Discussion and Conclusions. The mathematical model of the transformation of phosphorus, nitrogen and silicon forms in the problem of phytoplankton dynamics is studied. Stationary modes for the system of ordinary differential equations are obtained, for which the values of the system parameters and initial conditions are determined. The results obtained can be used in further simulation of the phytoplankton dynamics considering the transformation of phosphorus, nitrogen and silicon compounds with account for convection-diffusion, salinity, and temperature.

Ключевые слова: фитопланктон, фосфор, азот, кремний, биоген, химико-биологический источник, уравнение конвекции-диффузии-реакции, задача Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, стационарный режим.

Keywords: phytoplankton, phosphorus, nitrogen, silicon, biogen, chemical-biological source, convection-diffusion-response equation, Cauchy problem for system of ordinary differential equations, stationary mode.

Образец для цитирования. Белова, Ю. В. Исследование стационарных решений задачи динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния / Ю. В. Белова [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т.19, №1. — С. 4–12. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-4-12

For citation: Yu.V. Belova, et al. Study of stationary solutions to the problem of phytoplankton dynamics considering transformation of phosphorus, nitrogen and silicon compounds. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 4–12. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-4-12

Введение. В связи с развитием крупных городов на побережье мелководных водоемов и речных систем, впадающих в данные водоемы, участились случаи эвтрофикации. Рост водорослей в водоемах вызван увеличением стока азотных и фосфорных соединений с прилегающих районов суши. Каждый водный объект является уникальным и требует подробного исследования. Для изучения водоемов прибегают к натурным исследованиям [1], а также математическому моделированию. Не преуменьшая роли натурных экспериментов можно сказать, что математическое моделирование является менее затратным, а также позволяет прогнозировать поведение экосистемы.

Для изучения Азовского моря разработана трехмерная модель гидродинамики [2, 3], включающая уравнения движения по трем пространственным направлениям. В работе [4] данная модель выполнена для случая динамического перестроения геометрии расчетной области за счет приливно-отливных явлений. Исследование точности данной модели приведено в работе [5]. В работах [6–8] приведена реконструкция экологической катастрофы, произошедшей в 2001 году, вызванной чрезмерной концентрацией водорослей в восточной части Азовского моря. В работе [9] предложены методы борьбы с заморными явлениями, возникающими в Азовском море. Работы [10–12] посвящены изучению динамики фито- и зоопланктона.

Состояние вод в мелководных водоемах быстро меняется и математические модели требуют уточнения. Расчет параметров трехмерной модели динамики фито- и зоопланктона является трудоемким, поэтому предлагается для расчета данных параметров использовать упрощенную модель.

Цель данной работы состоит в уточнении параметров модели динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния, при которых наступают стационарные режимы в предположении пространственно- однородного распределения субстанций.

Материалы и методы. Модель основана на системе уравнений транспорта биогенных веществ [15, 16], вид которой для каждого модельного блока F_i имеет вид

$$\frac{\partial q_i}{\partial t}+u\frac{\partial q_i}{\partial x}+v\frac{\partial q_i}{\partial y}+w\frac{\partial q_i}{\partial z}=div\left(k\,\mathrm{grad}\,q_i\right)+R_{q_i}, \tag{1}$$

где q_i — концентрация i-ой компоненты, [мг/л]; $i \in M$, $M=\{F_1, F_2, F_3, PO_4, POP, DOP, NO_3, NO_2, NH_4, Si\}$; $\{u, v, w\}$ — компоненты вектора скорости водного потока, [м/с]; k - коэффициент турбулентного обмена, [м^2/с]; R_{q_i} — функция-источник биогенных веществ, [мг/л·с].

В уравнении (1) индекс i указывает на вид субстанции (таблица 1).

Таблица 1

Биогенные вещества в модели динамики фитопланктона

Номер	Обозначение	Название
1	F_1	зеленая водоросль Chlorella vulgaris
2	F_2	синезеленая водоросль Aphanizomenon flos-aquae
3	F_3	диатомовая водоросль Sceletonema costatum
4	PO_4	фосфаты
5	POP	взвешенный органический фосфор
6	DOP	растворенный органический фосфор
7	NO_3	нитраты
8	NO_2	нитриты
9	NH_4	аммоний
10	Si	растворенный неорганический кремний (кремниевые кислоты)

Химико-биологические реакции описаны следующими уравнениями

$$R_{F_i} = C_{F_i}(1-K_{F_iR})q_{F_i} - K_{F_iD}q_{F_i} - K_{F_iE}q_{F_i},\ i=\overline{1,3},$$

$$R_{POP} = \sum_{i=1}^{3} s_P K_{F_iD} q_{F_i} - K_{PD}q_{POP} - K_{PN}q_{POP},$$

$$R_{DOP} = \sum_{i=1}^{3} s_P K_{F_iE} q_{F_i} + K_{PD}q_{POP} - K_{DN}q_{DOP},$$

$$R_{PO_4} = \sum_{i=1}^{3} s_P C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)q_{F_i} + K_{PN}q_{POP} + K_{DN}q_{DOP},$$

$$R_{NH_4} = \sum_{i=1}^{3} s_N C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)\frac{f_N^{(2)}\left(q_{NH_4}\right)}{f_N\left(q_{NO_3}, q_{NO_2}, q_{NH_4}\right)} q_{F_i} + \sum_{i=1}^{3} s_N\left(K_{F_iD}+K_{F_iE}\right)q_{F_i} - K_{42}q_{NH_4},$$

$$R_{NO_2} = \sum_{i=1}^{3} s_N C_{F_i}(K_{F_iR}-1)\frac{f_N^{(1)}\left(q_{NO_3}, q_{NO_2}, q_{NH_4}\right)}{f_N\left(q_{NO_3}, q_{NO_2}, q_{NH_4}\right)}\cdot\frac{q_{NO_2}}{q_{NO_2}+q_{NO_3}} q_{F_i} + K_{42}q_{NH_4} - K_{23}q_{NO_2},$$

$$R_{NO_3} = \sum_{i=1}^{3} s_N C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)\frac{f_N^{(1)}\left(q_{NO_3}, q_{NO_2}, q_{NH_4}\right)}{f_N\left(q_{NO_3}, q_{NO_2}, q_{NH_4}\right)}\cdot\frac{q_{NO_3}}{q_{NO_2}+q_{NO_3}} q_{F_i} + K_{23}q_{NO_2},$$

$$R_{Si} = s_{Si} C_{F_3}\left(K_{F_3R}-1\right)q_{F_3} + s_{Si}K_{F_3D}q_{F_3}.$$

Здесь K_{F_iR} — удельная скорость дыхания фитопланктона; K_{F_iD} — удельная скорость отмирания фитопланктона; K_{F_iE} — удельная скорость экскреции фитопланктона; K_{PD} — удельная скорость автолиза *POP*; K_{PN} — коэффициент фосфатофикации *POP*; K_{DN} — коэффициент фосфатофикации *DOP*; K_{42} — удельная скорость окисления аммония до нитритов в процессе нитрификации; K_{23} — удельная скорость окисления нитритов до нитратов в процессе нитрификации, s_P, s_N, s_{Si} — нормировочные коэффициенты между содержанием *N*, *P*, *Si* в органическом веществе.

Скорость роста фитопланктона определяется выражениями:

$$C_{F_{1,2}} = K_{NF_{1,2}}\ min\left\{f_P\left(q_{PO_4}\right), f_N\left(q_{NO_3}, q_{NO_2}, q_{NH_4}\right)\right\},$$

$$C_{F_3} = K_{NF_3}\ min\left\{f_P\left(q_{PO_4}\right), f_N\left(q_{NO_3}, q_{NO_2}, q_{NH_4}\right), f_{Si}\left(q_{Si}\right)\right\},$$

где K_{NF} — максимальная удельная скорость роста фитопланктона.

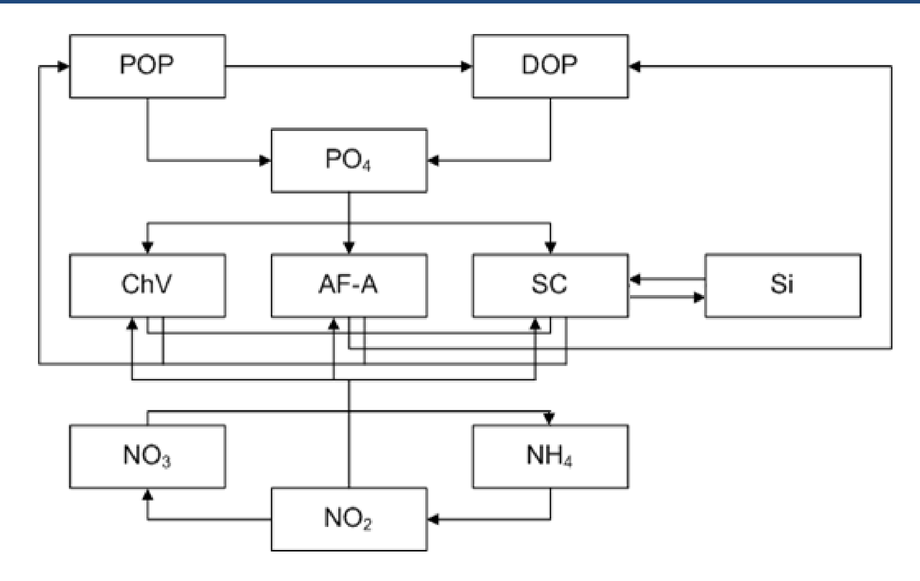


Рис. 1. Модельная схема биогеохимической трансформации форм фосфора, азота и кремния

Функции, описывающие содержания биогенов

– для фосфора $f_P\left(q_{PO_4}\right)=\dfrac{q_{PO_4}}{q_{PO_4}+K_{PO_4}}$,

где K_{PO_4} — константа полунасыщения фосфатами;

– для кремния $f_{Si}\left(q_{Si}\right)=\dfrac{q_{Si}}{q_{Si}+K_{Si}}$,

где K_{Si} — константа полунасыщения кремнием;

– для азота $f_N\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)=f_N^{(1)}\left(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4}\right)+f_N^{(2)}\left(q_{NH_4}\right)$,

$$f_N^{(1)}(q_{NO_3},q_{NO_2},q_{NH_4})=\frac{(q_{NO_3}+q_{NO_2})\exp(-K_{psi}q_{NH_4})}{K_{NO_3}+(q_{NO_3}+q_{NO_2})},\quad f_N^{(2)}(q_{NH_4})=\frac{q_{NH_4}}{K_{NH_4}+q_{NH_4}},$$

где K_{NO_3} — константа полунасыщения нитратами, K_{NH_4} — константа полунасыщения аммонием, K_{psi} — коэффициент ингибирования аммония.

Для системы (1) необходимо задать векторное поле скоростей водного потока, а также начальные значения функций концентраций q_i

$$q_i\left(x,y,z,0\right)=q_i^0\left(x,y,z\right),\ \left(x,y,z\right)\in\overline{G}.,\ t=0,\ i\in M. \tag{2}$$

Будем считать, что граница Σ цилиндрической области G является кусочно-гладкой и $\Sigma=\Sigma_H\cup\Sigma_o\cup\sigma$, где Σ_H — поверхность дна водоема, Σ_o — невозмущенная поверхность водной среды, σ — боковая (цилиндрическая) поверхность. Пусть u_n — нормальная по отношению к Σ составляющая вектора скорости водного потока, n — вектор внешней нормали к Σ. Для концентраций q_i будем предполагать:

– на боковой границе:

$$q_i=0,\ \text{на } \sigma,\ \text{если } u_n<0,\ i\in M; \tag{3}$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial n}=0,\ \text{на } \sigma,\ \text{если } u_n\ge 0,\ i\in M; \tag{4}$$

– на Σ_o — поверхность водоема:

$$\frac{\partial q_i}{\partial z}=0,\ i\in M; \tag{5}$$

– на дне Σ_H:

$$k\frac{\partial q_i}{\partial z} = \varepsilon_{1,i} q_i,\ i \in \{F_1, F_2, F_3\},$$

$$k\frac{\partial q_i}{\partial z} = \varepsilon_{2,i} q_i,\ i \in \{PO_4, POP, DOP, NO_3, NO_2, NH_4, Si\}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{1,i}$, $\varepsilon_{2,i}$ — скорости осаждения водорослей и питательных веществ на дно.

Стационарный режим. Рассмотрим случай пространственно-равномерного распределения субстанций (фитопланктона, форм фосфора, азота и кремния), тогда каждое из уравнений (1) упрощается и в результате получаем следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\frac{dq_{F_i}}{dt} = C_{F_i}(1-K_{F_iR})q_{F_i} - K_{F_iD}q_{F_i} - K_{F_iE}q_{F_i},\ i=\overline{1,3}, \quad (7)$$

$$\frac{dq_{POP}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} s_P K_{F_iD}q_{F_i} - K_{PD}q_{POP} - K_{PN}q_{POP},$$

$$\frac{dq_{DOP}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} s_P K_{F_iE}q_{F_i} + K_{PD}q_{POP} - K_{DN}q_{DOP},$$

$$\frac{dq_{PO_4}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} s_P C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)q_{F_i} + K_{PN}q_{POP} + K_{DN}q_{DOP},$$

$$\frac{dq_{NH_4}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} s_N C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)\frac{f_N^{(2)}(NH_4)}{f_N(NO_3,NO_2,NH_4)}q_{F_i} + \sum_{i=1}^{3} s_N\left(K_{F_iD}+K_{F_iE}\right)q_{F_i} - K_{42}q_{NH_4},$$

$$\frac{dq_{NO_2}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} s_N C_{F_i}(K_{F_iR}-1)\frac{f_N^{(1)}(NO_3,NO_2,NH_4)}{f_N(NO_3,NO_2,NH_4)}\cdot\frac{q_{NO_2}}{q_{NO_2}+q_{NO_3}}q_{F_i} + K_{42}q_{NH_4} - K_{23}q_{NO_2},$$

$$\frac{dq_{NO_3}}{dt} = \sum_{i=1}^{3} s_N C_{F_i}\left(K_{F_iR}-1\right)\frac{f_N^{(1)}\left(NO_3,NO_2,NH_4\right)}{f_N\left(NO_3,NO_2,NH_4\right)}\cdot\frac{q_{NO_3}}{q_{NO_2}+q_{NO_3}}q_{F_i} + K_{23}q_{NO_2},$$

$$\frac{dq_{Si}}{dt} = s_{Si}C_{F_3}\left(K_{F_3R}-1\right)q_{F_3} + s_{Si}K_{F_3D}q_{F_3}.$$

Решим систему обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты [15–17]. Проведем несколько численных экспериментов, предполагая, что развитие фитопланктона зависит от единственного лимитирующего вещества.

Результаты исследования. Для системы ОДУ (7) рассчитаем начальные условия и параметры уравнений, при которых наступают стационарные режимы. Возьмем начальные значения концентраций: $q_{F_1}(0) = 2{,}5$ *мг/л*, $q_{F_2}(0) = 2{,}6$ *мг/л*, $q_{F_3}(0) = 0{,}91$ *мг/л*, $q_{POP}(0) = 0{,}07$ *мг/л*, $q_{DOP}(0) = 0{,}07$ *мг/л*, $q_{PO_4}(0) = 0{,}005$ *мг/л*, $q_{NH_4}(0) = 0{,}11$ *мг/л*, $q_{NO_2}(0) = 0{,}0178$ *мг/л*, $q_{NO_3}(0) = 0{,}304$ *мг/л*, $q_{Si}(0) = 0{,}4$ *мг/л*; коэффициенты: $K_{NF_i} = 2{,}8$ *сут*$^{-1}$, $K_{F_iR} = 0{,}15$ *сут*$^{-1}$, $K_{F_iD} = 0{,}05$ *сут*$^{-1}$, $K_{F_iE} = 0{,}15$ *сут*$^{-1}$, $K_{PD} = 0{,}015$ *сут*$^{-1}$, $K_{PN} = 0{,}02$ *сут*$^{-1}$, $K_{DN} = 0{,}1$ *сут*$^{-1}$, $K_{42} = 0{,}9$ *сут*$^{-1}$, $K_{23} = 2{,}5$ *сут*$^{-1}$, $K_{psi} = 1{,}46$ *сут*$^{-1}$, $s_P = 0{,}01$, $s_N = 0{,}016$, $s_{Si} = 0{,}023$, $K_{PO_4} = 0{,}024$, $K_{NO_3} = 3{,}0$, $K_{NH_4} = 2{,}0$, $K_{Si} = 3{,}0$.

Полученные стационарные режимы системы ОДУ (7) в предположении, что развитие фитопланктона лимитируется единственным биогенным веществом —фосфором, азотом или кремнием — изображены на рис. 2–4 соответственно. Рис. 2 описывает влияние фосфора на развитие различных видов фитопланктона, рис. 3 описывает влияние азота на развитие различных видов фитопланктона, рис. 4 описывает влияние азота на развитие диатомовых водорослей.

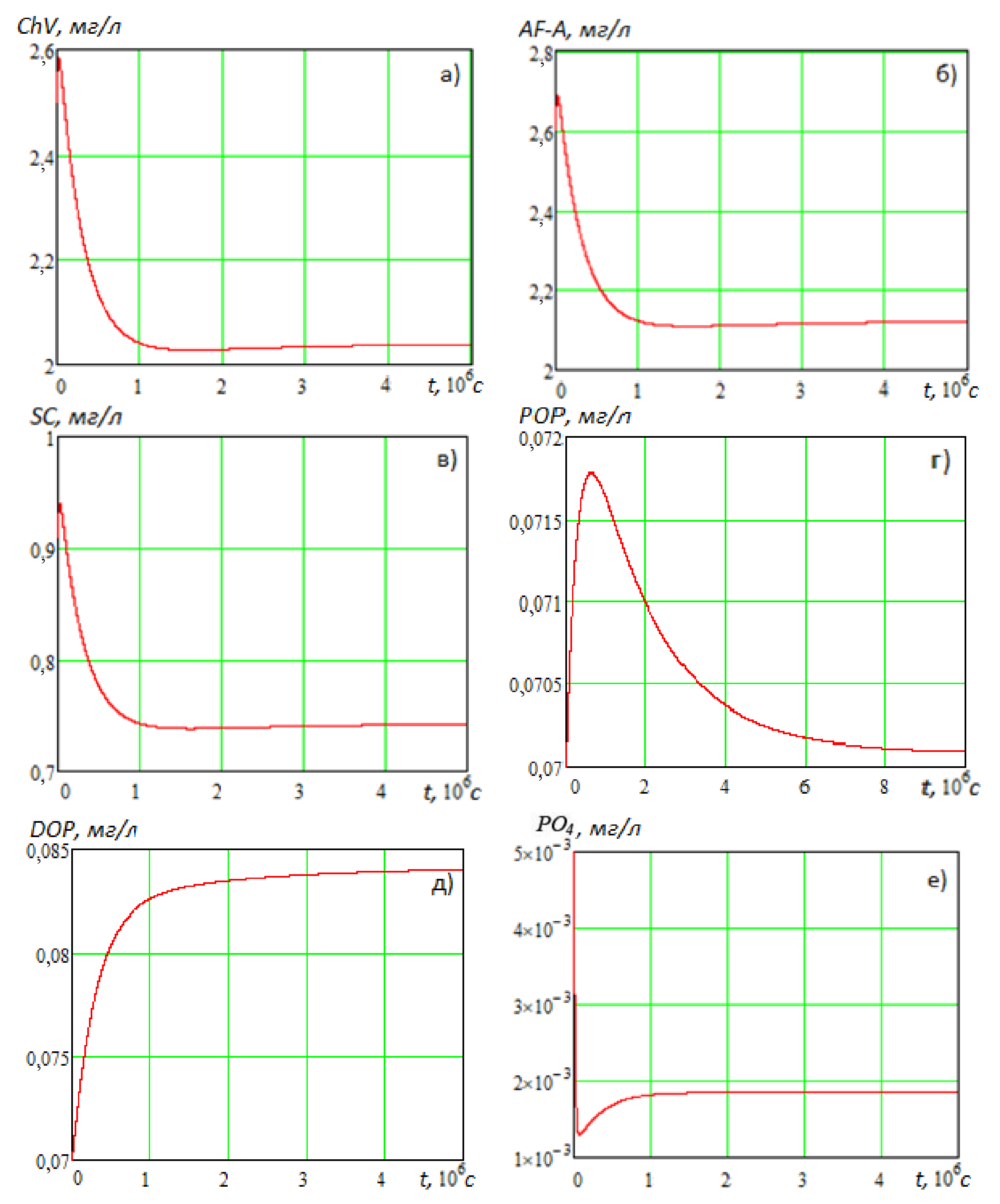


Рис. 2. Стационарный режим системы ОДУ в предположении, что развитие фитопланктона лимитируется фосфором: а) зеленая водоросль (*ChV*), б) синезеленая водоросль (*AF-A*), в) диатомовая водоросль (*SC*), г) взвешенный органический фосфор (*POP*), д) растворенный органический фосфор (*DOP*), е) фосфаты (PO_4)

В результате вычислительного эксперимента видно, что при указанных выше значениях начальных концентраций и параметров уравнений наступают стационарные режимы для системы ОДУ (7), описывающей случай пространственно-равномерного распределения субстанций. Полученные значения в дальнейшем будут использованы для моделирования пространственно-неоднородного распределения субстанций, солености и температуры с учетом движения водной среды [18].

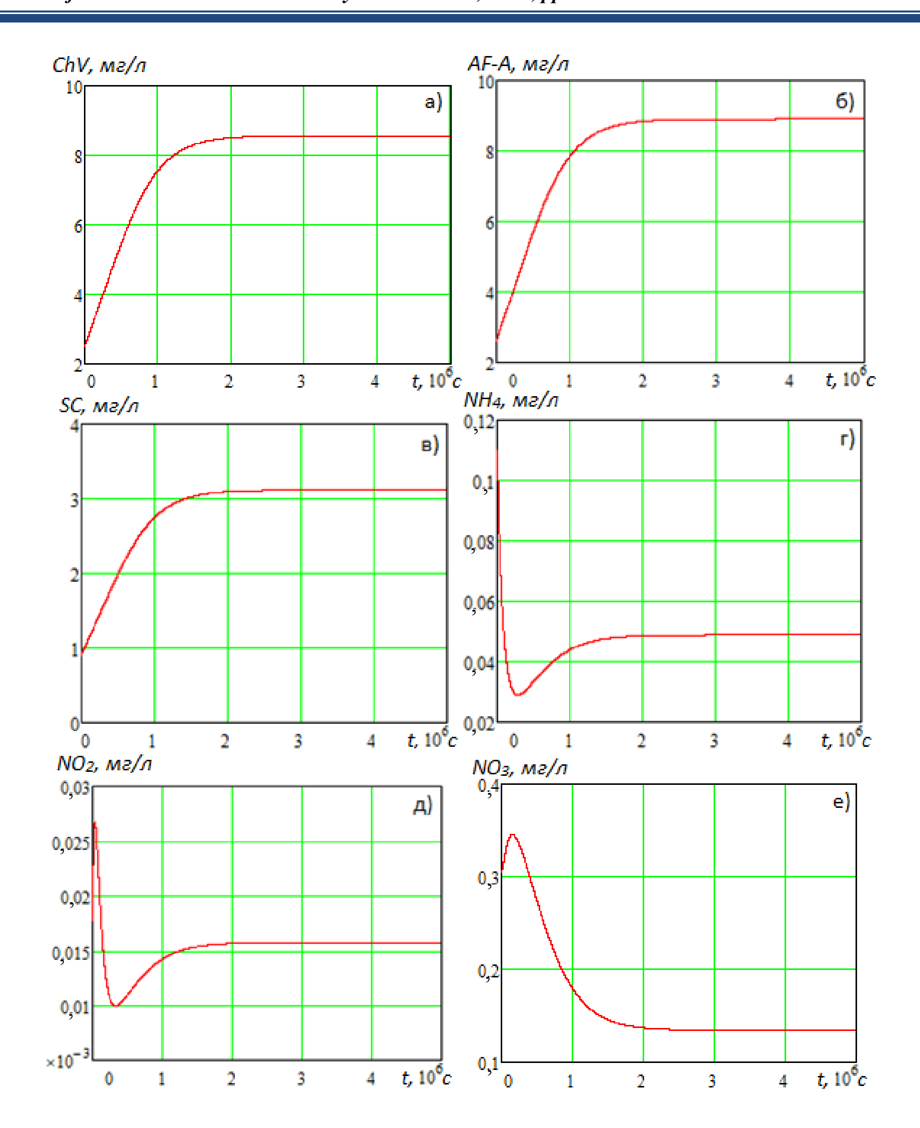


Рис. 3. Стационарный режим системы ОДУ в предположении, что развитие фитопланктона лимитируется азотом: а) зеленая водоросль (*ChV*), б) синезеленая водоросль (*AF-A*), в) диатомовая водоросль (*SC*), г) аммоний (NH_4), д) нитриты (NO_2), е) нитраты (NO_3)

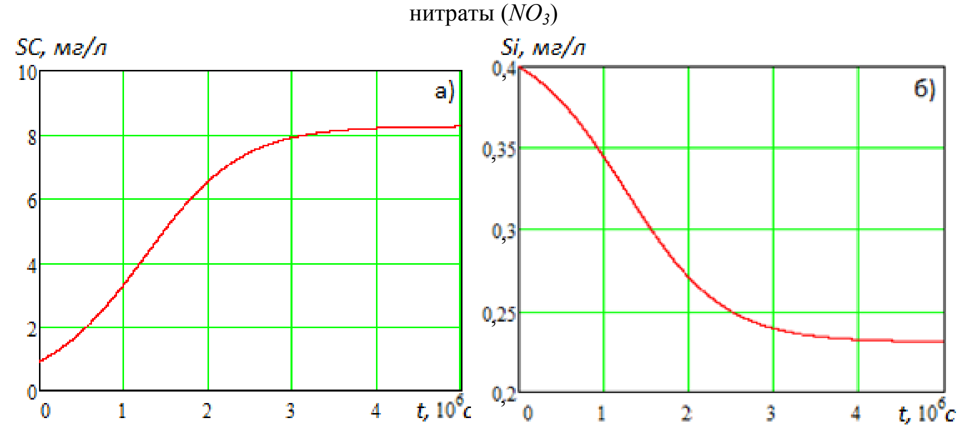


Рис. 4. Стационарный режим системы ОДУ в предположении, что развитие фитопланктона (диатомовых водорослей) лимитируется кремнием: а) диатомовая водоросль (*SC*), б) кремний (*Si*)

Заключение. В данной работе исследована математическая модель трансформации форм фосфора, азота и кремния в задаче динамики фитопланктона. Рассмотрен случай пространственно-равномерного распределения субстанций (фитопланктона, форм фосфора, азота и кремния). Система разбивается на три системы обыкновенных дифференциальных уравнений, каждая из которых моделирует зависимость роста фитопланктона от единственного питательного вещества. Эти системы решены методом Рунге-Кутты, получены стационарные режимы (рис. 2–4), для которых определены значения параметров системы и начальные условия.

Полученные результаты будут использованы для дальнейшего моделирования динамики фитопланктона с учетом трансформации соединений фосфора, азота и кремния с учетом конвекции-диффузии, солености, температуры.

Библиографический список

1. Якушев, Е. В. Комплексные океанологические исследования Азовского моря в 28-м рейсе научно-исследовательского судна «Акванавт» / Е. В. Якушев, А. И. Сухинов // Океанология. — 2003. — Т. 43. — № 1. — С.44–53.

2. Сухинов, А. И. Численное моделирование экологического состояния Азовского моря с применением схем повышенного порядка точности на многопроцессорной вычислительной системе / А. И. Сухинов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8. — № 1. — С. 151–168.

3. Sukhinov, A.I., Sukhinov A.A. 3D model of diffusion-advection-aggregation suspensions in a water basins and its parallel realization. Parallel Computational Fluid Dynamics 2004: Multidisciplinary Applications — 2005. — pp. 223–230. DOI: 10.1016/B978-044452024-1/50029-4.

4. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Shishenya, A.V., Timofeeva, E.F. Mathematical model for calculating coastal wave processes. Mathematical Models and Computer Simulations. — 2013. — Т. 5. — № 2. — pp. 122–129. DOI: 10.1134/S2070048213020087.

5. Сухинов, А. И. Предсказательное моделирование прибрежных гидрофизических процессов на многопроцессорной системе с использованием явных схем / А. И. Сухинов [и др.] // Математическое моделирование. — 2018. — Т. 30. — № 3. — С. 83–100.

6. Сухинов, А. И. Математическое моделирование условий формирования заморов в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе / А. И. Сухинов [и др.] // Вычислительные методы и программирование. — 2013. — Т. 14. — № 1. — С. 103–112.

7. Sukhinov, A.I., Sukhinov A.A. Reconstruction of 2001 ecological disaster in the Azov sea on the basis of precise hydrophysics models. Parallel Computational Fluid Dynamics 2004: Multidisciplinary Applications — 2005. — pp. 231–238. DOI: 10.1016/B978-044452024-1/50030-0.

8. Debolskaya, E.I., Yakushev, E.V., Sukhinov, A.I. Formation of fish kills and anaerobic conditions in the sea of Azov. Water Resources. — 2005. — Т. 32. — № 2. — pp. 151-162. DOI: 10.1007/s11268-005-0020-5.

9. Никитина, А. В. Оптимальное управление устойчивым развитием при биологической реабилитации Азовского моря / А. В. Никитина [и др.] // Математическое моделирование. — 2016. — Т. 28. — № 7. — С. 96–106.

10. Сухинов, А. И. Математическое моделирование процессов эвтрофикации в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе / А. И. Сухинов, А.В. Никитина, А.Е. Чистяков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. — 2016. — Т. 5. — № 3. — С. 36 –53.

11. Никитина, А. В. Дифференциально-игровая модель предотвращения заморов в мелководных водоемах / А. В. Никитина, М. В. Пучкин, И. С. Семенов // Управление большими системами. — 2015. — Вып. 55. — С. 343–361.

12. Сухинов, А. И. Математическая модель трансформации форм фосфора, азота и кремния в движущейся турбулентной водной среде в задачах динамики планктонных популяций / А. И. Сухинов, Ю. В. Белова // Инженерный вестник Дона. — 2015. — Т. 37. — № 3. — С. 50.

13. Дегтярева, Е. Е. Программная реализация трехмерной математической модели транспорта взвеси в мелководных акваториях [Электронный ресурс] / Е. Е. Дегтярева, Е. А. Проценко, А. Е. Чистяков // Инженерный вестник Дона. — 2012. — Т. 23. — № 4 — 2. –30 с. — Режим доступа : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1283 (дата обращения : 12.12.2018).

14. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский — Москва : Наука, 1989. — 616 с.

15. Сухинов, А. И. Достаточные условия сходимости положительных решений линеаризованной двумерной задачи транспорта наносов / А. И. Сухинов, В. В. Сидорякина, А. А. Сухинов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17. — № 1 (88). — С. 5–17.

16. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. — Москва : Наука, 1978. — 532 с.

17. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. — Москва : Наука, 1982. — 319 с.

18. Белова, Ю. В. О четырехслойной итерационной схеме / Ю. В. Белова, А. Е. Чистяков, У. А. Проценко //Вестник Донского гос. техн. ун-та. 2016. — Т.16. — № 4 (87). — С. 146–149.

Поступила в редакцию 20.11.2018
Сдана в редакцию 21.11.2018
Запланирована в номер 11.01.2019

Received 20.11 .2018
Submitted 21.12.2018
Scheduled in the issue 11.01.2019

Об авторах:

Белова Юлия Валериевна,
младший научный сотрудник НИИ «Математическое моделирование и прогнозирование сложных систем» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2639-7451
yvbelova@yandex.ru

Атаян Ася Михайловна,
ассистент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4629-1002
atayan24@yandex.ru

Чистяков Александр Евгеньевич,
профессор кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8323-6005
cheese_05@mail.ru

Стражко Александр Валентинович,
студент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2449-8531
strajcko2@gmail.com

Authors:

Belova, Yuliya V.,
Junior research scholar, Research Institute for Mathematical Modeling and Forecasting of Complex Systems, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2639-7451
yvbelova@yandex.ru

Atayan, Asya M.,
teaching assistant of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4629-1002
atayan24@yandex.ru

Chistyakov, Aleksandr E.,
professor of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8323-6005
cheese_05@mail.ru

Strazhko, Aleksandr V.,
student of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2449-8531
strajcko2@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.382 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-13-23

Исследование гидравлического контура управления адаптивного гидропривода подачи инструмента мобильной буровой машины*

В. С. Сидоренко[1], В. И. Грищенко[2], С. В. Ракуленко[3], М. С. Полешкин[4], Д. Д. Дымочкин[5]**
[1,2,3,4,5]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on oil pilot circuit of adaptive hydraulic drive of tool advance in mobile drilling machine***

V. S. Sidorenko[1], V. I. Grishchenko[2], S. V. Rakulenko[3], M.S. Poleshkin[4], D.D. Dymochkin[5]**
[1,2,3,4,5] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованию адаптивного гидропривода подачи инструмента мобильной буровой машины на примере установки УРБ-2,5. Рассмотрен типовой технологический цикл мобильной буровой машины, определены критерии функционирования. По результатам анализа предложено оригинальное схемотехническое решение адаптивного гидропривода. Адаптации гидропривода подачи инструмента осуществляется при помощи регулируемого объемного гидродвигателя с контуром гидравлического управления при изменяющейся нагрузке на инструменте в процессе бурения.
Материалы и методы. Предварительным вычислительным экспериментом в программе Matlab Simulink определены параметры устройств контура управления: гидромеханического датчика и гидроуправлямого клапана, на основе которых реализована экспериментальная установка. Выполненный многофакторный эксперимент позволил идентифицировать процессы в оригинальном гидравлическом контуре управления гидромотором при различных режимах нагружения инструмента.
Результаты исследования. Получены и определены кинематические и силовые характеристики гидромеханической системы мобильной буровой установки, влияние гидравлического управления на параметры настройки устройств контура. Результаты позволили определить рациональные диапазоны функционирования гидромеханической системы для типового рабочего цикла.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при создании гидросистем новых буровых машин с различными характеристиками. Использование разработанных методик исследования и обработки их результатов позволит сократить затраты времени и средств при проектировании адаптивных гидросистем мобильных технологических машин, создании опытных образцов и проведении пуско-наладочных работ.

Introduction. An adaptive hydraulic drive of the tool advance in a mobile drilling machine is studied on the example of the URB-2.5 installation. A typical technological cycle of the mobile drilling machine is considered; the performance criteria are defined. An original design of the adaptive hydraulic drive is proposed on the basis of the analysis. Adaptation of the hydraulic drive of the tool advance is carried out using an adjustable volumetric hydraulic motor with a hydraulic control circuit under discontinuous loads on the tool during the drilling process.
Materials and Methods. Through a preliminary computational experiment in the Matlab Simulink program, the following parameters of the control loop devices were determined: a hydromechanical sensor and a hydraulically controlled valve, on the basis of which the experimental setup was implemented. The performed multifactor experiment allowed identifying the processes in the original hydraulic control circuit of the hydraulic motor under various modes of tool loading.
Research Results. The kinematic and power characteristics of the hydromechanical system of a mobile drilling rig, the hydraulic control effect on the settings of the hydraulic control circuit devices were obtained and determined. The results enabled to specify the rational ranges of the hydromechanical system operation for a typical work cycle.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used to create hydraulic systems of new drilling machines with various characteristics. The application of the developed techniques of research and processing of their results will reduce the time and costs involved in designing adaptive hydraulic systems for mobile technological machines, creating prototypes and conducting commissioning procedures.



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: v.sidorenko1942@gmail.com, vig84@yandex.ru, rakulenko84@mail.com, poleshkin.maks@gmail.com., dydedmi_77_06_02@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: адаптивный гидропривод, мобильная буровая установка, технологический цикл бурения, контур гидравлического управления, гидромеханический датчик, кинематические и силовые характеристики.

Keywords: adaptive hydraulic drive, mobile drilling unit, drilling technological cycle, hydraulic control circuit, hydromechanical sensor, kinematic and power characteristics.

Образец для цитирования. Сидоренко, В. С. Исследование гидравлического контура управления адаптивного гидропривода подачи инструмента мобильной буровой машины / В. С. Сидоренко [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т.19, №1. — С. 13–23. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-13-23

For citation: V.S. Sidorenko, et al. Study on oil pilot circuit of adaptive hydraulic drive of tool advance in mobile drilling machine. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 13–23. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-13-23

Введение. Динамичное освоение природных ресурсов требует совершенствования действующих и создание новых автоматизированных комплексов технологического оборудования бурового производства с улучшенными механическими и энергетическими характеристиками. Анализ известных схемотехнических решений гидромеханических систем (ГМС) мобильных буровых машин (МБМ) выявил основную характерную особенность их построения — многодвигательная система, в которой важно учитывать влияние привода подачи инструмента и привода главного движения при технологическом цикле [1–4]. При этом качество, производительность и безопасность работы напрямую зависит от того, как согласуются кинематические и силовые параметры (V, М и др.) в процессе изменения нагрузок на инструменте [4, 5]. В связи с вышеизложенным, целью работы являлось повышение эффективности гидромеханической системы рабочих движений МБМ путем разработки и исследования ее контура гидравлического управления.

Критерии функционирования. В процессе бурения важным критерием является выполнение основного требования технологии — согласование работы привода главного движения и подачи, обеспечивая стабильную подачу на оборот инструмента [6].

Используя основные законы подобия различных технологических циклов, нетрудно применить приведенные рассуждения и к технологии бурения различных скважин [7, 8].

Производительность $П_О$ определяется:

$$П_О = 1/T_{ОЦ} \quad (1)$$

$$П_{СЦ} = П_О \cdot k_ц\, k_ц = L_{СК} / L_{ОЦ} \quad (2)$$

$$T_{ОЦ} = T_{МАШ} + T_{ВС} + T_{ПЗ} + T_{ОБСЛ} + T_{РЕМ}. \quad (3)$$

$$T_{МАШ} = L_{ОЦ} / V_n;\ V_n = S_o \cdot n_И \quad (4)$$

$$n_И = 1000 \cdot V_{БУР} / 3{,}14 \cdot D_И. \quad (5)$$

$T_{ОЦ}$ — время опорного цикла; $T_{ПЗ}$ — время наладки следующего опорного рабочего цикла (наращивание длины инструмента); $T_{МАШ}$ — машинное время, затрачиваемое на операцию резания (бурения) при перемещении инструмента на величину $L_{ОЦ}$ со скоростью V_n;

При выполнении условия S_0 = const, стойкость инструмента соответствует нормативной $T_Н$ = [$T_{ИН}$] при диаметре $D_И$ и частоте вращения $n_И$ инструмента. В этом случае сокращается количество смен инструмента на всей глубине бурения $L_{СК} = L_{ОЦ} \cdot k_ц$.

$T_{ВС}$ — время, затрачиваемое на установочные, наладочные операции, смену инструмента. Регламентируется типом оборудования [7];

$T_{ОБСЛ}$ — время смены (замены) инструмента плановый после выработки его технологической стойкости $T_Н$;

$T_{РЕМ}$ — время на устранение отказов, при повышенной надежности сокращается; $V_{БУР}$, S_o — нормативы бурения грунтов различных категорий по σ_i или из практики буровых работ в каждом регионе [5].

Долговечность инструмента и производительность напрямую зависят от стабильности величины $S_o(t)$ (рабочая технологическая подача на оборот) [7, 9]. Это достигается, если при уменьшении частоты вращения инструмента n(t), синхронно уменьшается скорость минутной подачи $S_м(t)$, осуществляемой приводом зависимой подачи МБМ. В случае, если не учитываются упругие деформации в кинематической цепи подачи инструмента, величина подачи определяется:

$$S_0(t) = \frac{2\pi \cdot v(t)}{\omega(t)} \quad (6)$$

$$S_М(t) = \frac{v(t)}{60} \quad (7)$$

$$\omega(t) = 2\pi \cdot n(t) \quad (8)$$

где $v(t)$ — скорость линейной подачи инструмента, м/с; $\omega(t) = 2\pi \cdot n(t)$ — угловые скорости вращения инструмента, рад/с; $n(t)$ — частота вращения инструмента, об/с.

Возможности жесткой стабилизации каждого из рабочих движений в условиях применения гидропривода, как известно, ограничены. В технологических машинах такого типа задача адаптации объемного гидропривода не решается в автоматическом режиме, а производится вручную оператором [3, 10].

Схемотехническое решение. На основе ранее предложенной структурной схемы [11], а также анализа типовых циклов работы МБМ, предлагается принципиальная комбинированная схема МБМ УРБ-2,5 (рис. 1), учитывающая особенности поведения и состав ее механической подсистемы.

Энергосиловая система машины состоит из гидравлических нерегулируемых аксиально-поршневых насосов Н1, Н4, установленных на раздаточную коробку шасси через коробки отбора мощности (КОМ). Управление КОМ электропневматическое, осуществляется переключателями, установленными в кабине автошасси [10, 12].

Контур гидравлического управления (КГУ) установки получает гидравлическую энергию от тандем-насоса Н2, приводимого во вращение электродвигателем. Электродвигатель получает энергию от генератора автошасси. Первая секция Н2 направляет гидравлическую энергию к датчику ГМД1, вторая — к гидроуправляемому клапану (ГУК).

Работа обоих контуров КГУ происходит без нагрузки, поэтому перегрев электродвигателя тандем-насоса Н2 исключен. Каждый насос тандема имеет предохранительно-переливной клапан с электрическим управлением КП2, КП3. Давление контролируется соответственно по манометрам МН3 и МН5. КГУ имеет собственный закрытый гидравлический бак Б2 [13]. Основным гидравлическим баком является бак Б1, оснащенный сливными фильтрами Ф1, Ф2, Ф3, теплообменными аппаратами ТО1 и ТО2.

Гидравлическая система (ГС) МБМ разделена на два больших контура. Во вспомогательный контур входит привод аутригеров (ГЦ1, ГЦ2), привод подъема-опускания мачты (ГЦ3), привод лебедки (ГМ3). В основной контур входит привод главного движения инструмента (роторный стол) и привод подачи (рис. 1).

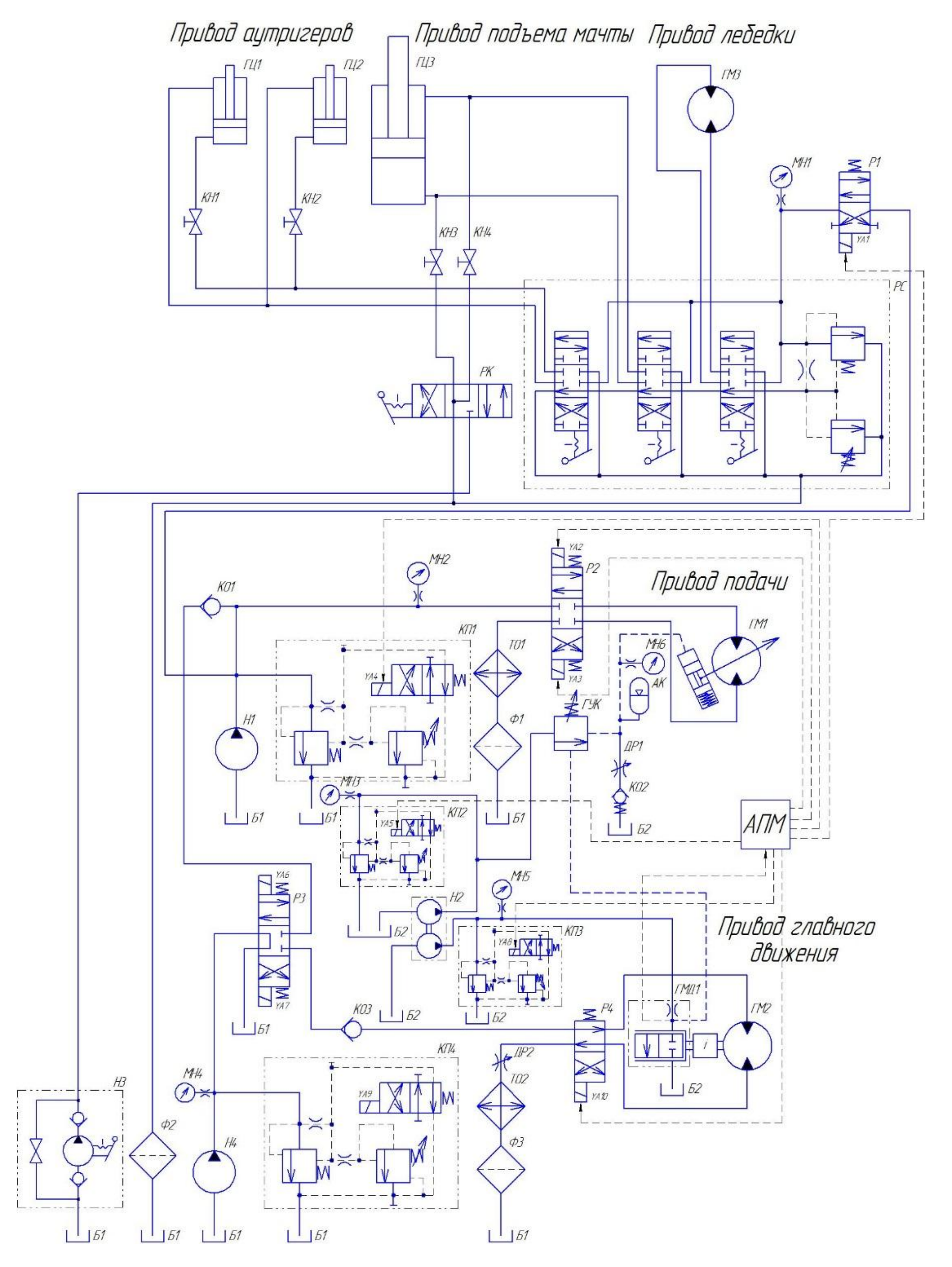


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема МБМ УРБ-2,5

Входящий в основной контур привод подачи инструмента, получает гидравлическую энергию от гидронасоса Н1. Насос оснащен предохранительно-переливным клапаном КП1 с электрическим управлением. Рабочее давление контролируется по манометру МН2. Реверс движения, останов обеспечивает трехпозиционный распределитель Р2 с электрическим управлением с закрытым центром. Гидромотор ГМ1 привода подачи, регулируемый через механическую передачу, обеспечивает продольную подачу бурового инструмента. Теплообменный аппарат ТО1 и фильтр Ф1 обеспечивают фильтрацию и кондиционирование рабочей жидкости.

Насос Н4 приводится во вращение аналогично насосу Н1 (рис. 1). Распределитель Р3 обеспечивает пуск, останов привода главного движения или увеличение скорости подачи при ускоренных перемещениях работы привода подачи. В этом случае включается верхняя позиция распределителя и поток насоса Н4 через обратный клапан КО1 поступает в контур подачи привода, суммируется с потоком насоса Н1, обеспечивая быстрый спуск или подъем инструмента из скважины. При работе насоса Н4 на привод главного движения (Р3

в нижней позиции) обратный клапан КО1 препятствует сливу рабочей жидкости из контура подачи в бак Б1 [13].

Аналогичную функцию выполняет обратный клапан КО3 при работе насоса на привод подачи. Распределитель Р4 обеспечивает реверс привода главного движения. С помощью дросселя ДР2 настраивается скорость вращения инструмента (на холостом ходу).

Теплообменный аппарат ТО2 и сливной фильтр Ф3 обеспечивают фильтрацию и кондиционирование рабочей жидкости контура привода вращения.

Контур КГУ включает два оригинальных устройства — гидроуправляемый клапан ГУК (4) и гидравлический многопараметрический датчик ГМД (5) (рис. 2) [14]. При ускоренных перемещениях привода подачи, описанных ранее, насос Н2 (рис. 1) автоматически отключается системой управления (АПМ).

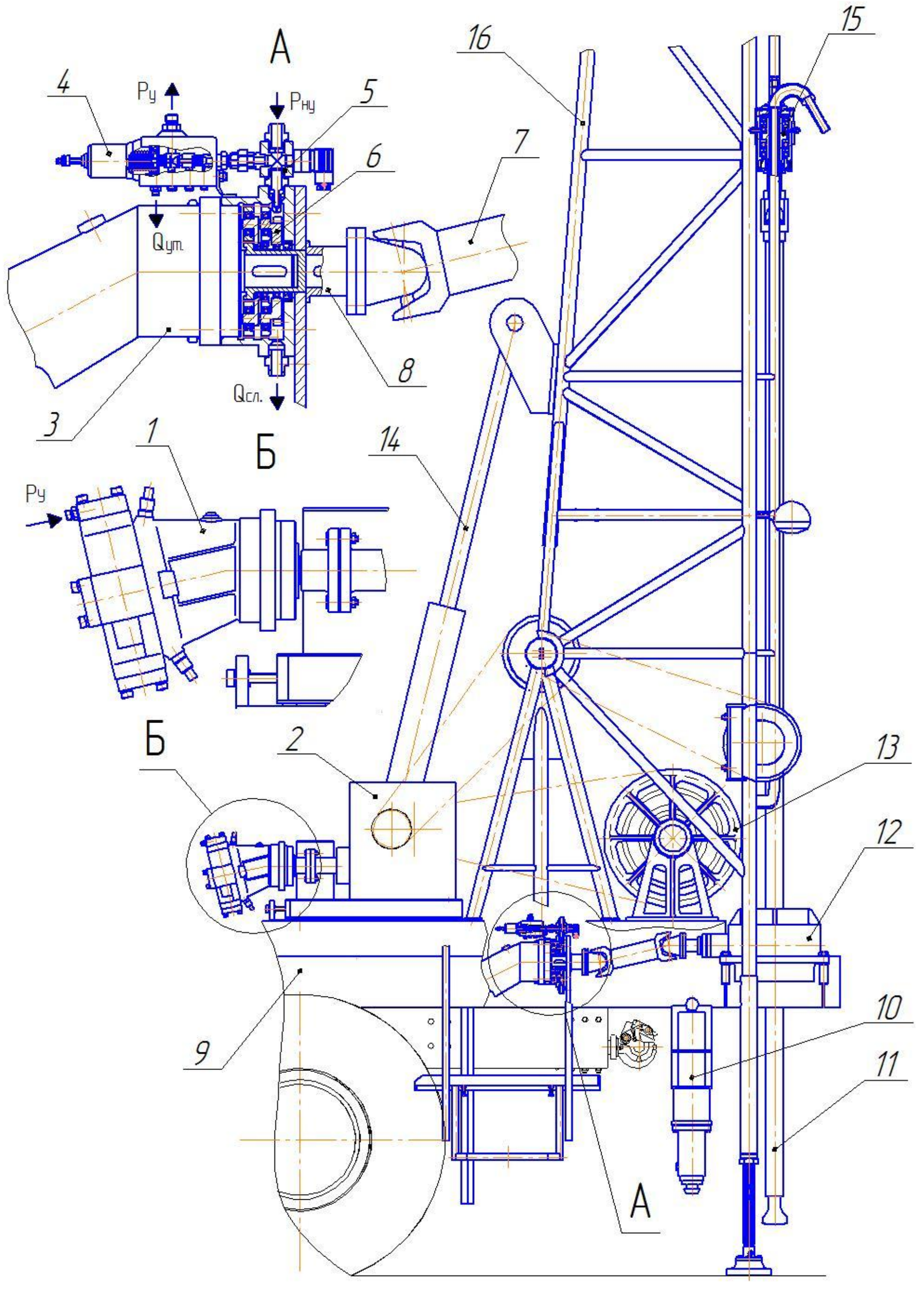


Рис. 2. Общий вид МБМ: 1 — гидромотор регулируемый; 2 — привод подачи инструмента; 3 — гидромотор нерегулируемый; 4 — клапан ГУК; 5 — датчик ГМД; 6 — редуктор; 7 — вал карданный; 8 — муфта; 9 — автошасси; 10 — система аутригеров; 11 — инструмент; 12 — привод главного движения; 13 — лебедка двухбарабанная; 14 — гидроцилиндр подъема (опускания) мачты; 15 — вертлюг; 16 – мачта

Принцип работы КГУ (рис. 2) в составе гидросистемы МБМ заключается в следующем: вал ГМД (5) механически связан с валом ГМ2 через редуктор (6). Колебание давления на входе ГМД (5) передается на вход управления ГУК (4), который с помощью подбора пружин настраивается на такой режим работы, при котором на его выходе формируется среднедействующее давление, пропорциональное амплитуде колебаний, и, соответственно, скорости вращения вала гидромотора ГМ1.

При увеличении момента сопротивления на валу гидромотора ГМ2, скорость вращения вала и частота колебаний на входе ГМД уменьшается, а амплитуда давления увеличивается. При ее увеличении увеличивается среднее значение открытия клапана ГУК, который подает большее количество жидкости от Н2 к блоку регулятора ГМ1 привода подачи. Давление управления Ру на выходе ГУК возрастает, что обеспечивает увеличение рабочего объема гидромотора и снижает скорость движения подачи. Механизм функционирования контура КГУ в составе ГМС с зависимой подачей инструмента, а также принцип работы блока АПМ рассмотрен в работе [15].

Гидроаккумулятор АК сглаживает пульсацию давления управления Ру на входе управления гидромотора ГМ1. С помощью настройки дросселей ДР1, ДР2 и подбора клапана давления КО3 настраиваются предельные значения скоростей подачи и вращения инструмента и формируется требуемая функциональная зависимость между скоростями рабочих движений.

Оригинальный ГУК отличается функцией непрерывного регулирования сечения проточной части клапана. Следовательно, существует возможность регулирования производительности гидромотора во всем диапазоне изменения скорости.

Экспериментальное исследование. Для идентификации параметров ГМД, работающего в заданных условиях, разработано специальное стендовое оборудование и оснастка [13]. Расход гидромотора определялся при помощи турбинного датчика-расходомера, подключенного через плату преобразователь ЦАП-АЦП. Диапазоны регулирования параметров при исследовании приведены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазоны параметров при исследовании ГМД

№	Параметр	Обозначение	Диапазон	Ед. измерения	Устройство контроля
1	Диаметр сопла	$d_{сп}$	0,5–1,2	мм	Калибр-пробка
2	Дроссельной шайбы	$d_{др}$	0,8–2	мм	Калибр-пробка
3	Зазор между соплом и модулятором	$y_з$	0,2–1	мм	Индикатор часового типа
4	Частота вращения	$n_{гмд}$	5–60	об/мин	Датчик частоты вращения
5	Расход через ГМД	$Q_{гмд}$	0,5–20	л/мин	Расходомер, мерный бак
6	Давление в ГМД	$p_{гмд}$	0,5–5	МПа	Датчик давления
7	Характерный конструктивный параметр сечения проточной части ГМД	$x_д$	2–8	мм	Штангенциркуль

Скорость перемещения и ускорение вала ГМ (привод подачи) определяли последовательным дифференцированием перемещения по времени по следующим формулам, реализуемым постобработкой данных в программе «PowerGraph» [8, 11, 16]:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (9)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega}{dt}, \quad (10)$$

где ω — угловая скорость ГМ, рад/с; ε — угловое ускорение ГМ, рад/с^2.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных по известным методикам [17, 18] представлены на рис. 3–9.

График на рис. 3 поясняет отклик по амплитуде колебаний давления ГМД при изменении скорости вращения гидромотора ГМ1 в диапазоне 45–125 рад/с. Данные получены при испытаниях сопел с диаметрами

$d_{сп}$=2,4,6 мм. В результате зависимость изменения давления имела практически линейный характер и падала по мере увеличения скорости, что связано с нестационарным режимом истечения рабочей жидкости через элемент сопло-заслонка.

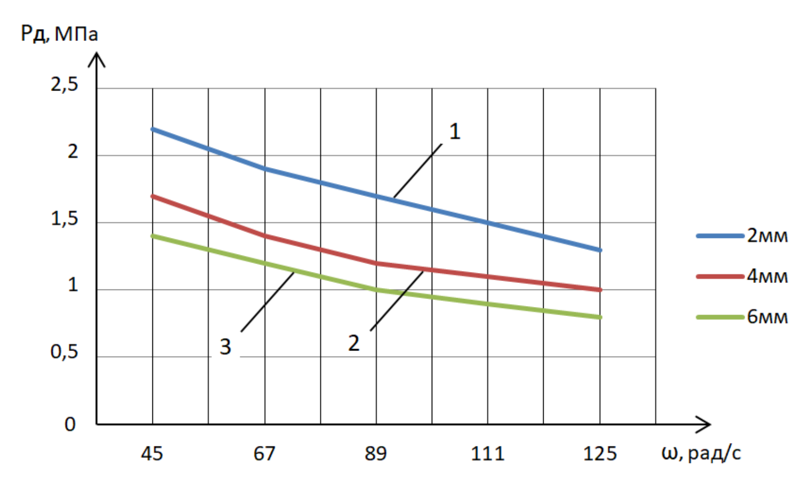


Рис. 3. Зависимость величины колебаний давления $P_Д$ от скорости вращения ω гидромотора ГМ1, аппроксимации: 1 — $P_Д=0,14\omega^2-3\omega+24,8$; 2 — $P_Д=0,36\omega^2-3,84\omega+20,4$; 3 — $P_Д=0,21\omega^2-2,8\omega+16,6$

Результаты, представленные на рис. 4, показывают, что при увеличении характерного конструктивного параметра сечения проточной части ГМД $X_Д$ с 2 до 8 мм, уровень давления управления изменяется с 1,9 до 1,4 МПа. Это позволяет сделать рекомендации по дальнейшей оптимизации проточной части ГМД [19]. В частности, по некоторому увеличению ХД. Однако дальнейшее ее увеличение нецелесообразно, поскольку увеличивает геометрические размеры диска модулятора.

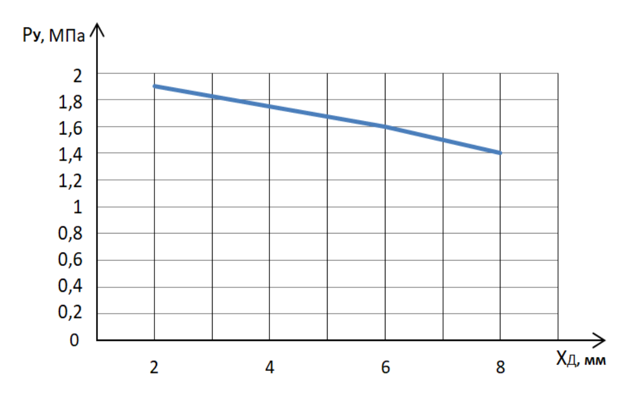


Рис. 4. Зависимость изменения давления управления $P_у$ от влияния характерного конструктивного параметра сечения проточной части ГМД $X_Д$, аппроксимация: $P_У=1,65X_Д+20,75$

На рис. 5 представлено влияние конструктивных особенностей $X_Д$ на максимальную амплитуду давления $P_{дmax}$, используемую для контура гидравлического управления при подводе к ГУК.

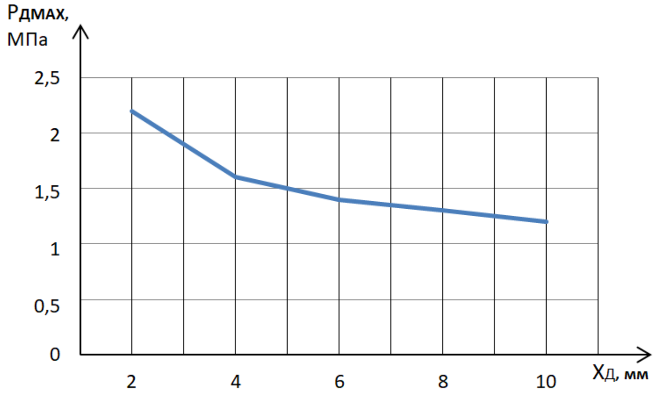


Рис. 5. Зависимость изменения максимальной амплитуды давления управления $P_{Д.MAX}$ от влияния характерного конструктивного параметра сечения проточной части ГМД $X_Д$, аппроксимация: $P_{ДMAX}=21,46X_Д^{-0,372}$

При идентификации важным этапом было определение в цепи КГУ: ГМД — ГУК степень влияния параметров настройки каждого элемента управления. Так, параметром настройки ГУК, при функционировании контура управления, является жесткость его пружины $C_{пр}$, подбор которой существенно влияет на чувствительность подсистемы управления [20].

Построенная на рис. 6 характеристика, аппроксимированная по результатам эксперимента, носит линейный характер, и поясняет величину падения максимального давления управления с 1,7 до 1,4 МПа при изменении жесткости пружины ГУК.

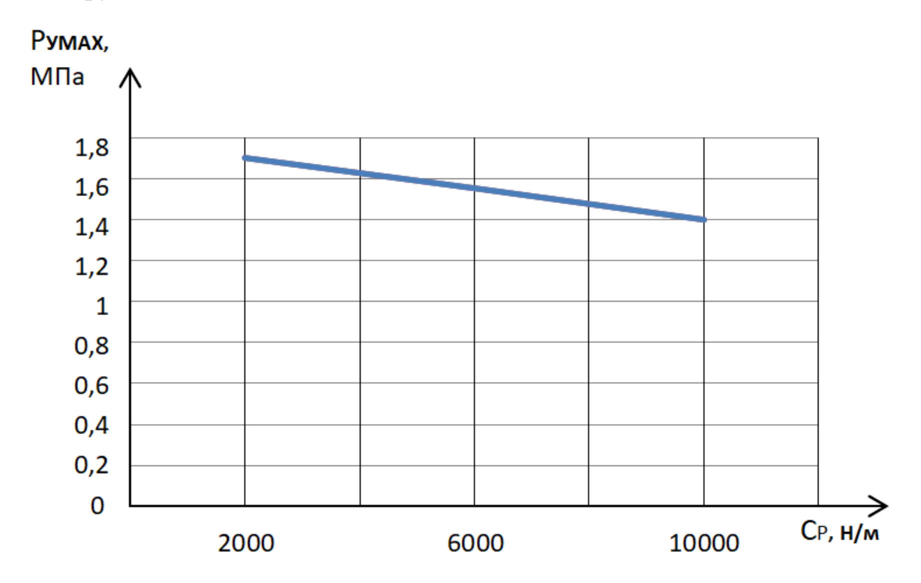


Рис. 6. Зависимость изменения максимального давления управления $P_{у.max}$ от величины жесткости пружины ГУК, аппроксимация: $P_{УМАХ}$=1,5$C_Р$+18,5

Второй элемент настройки в контуре с ГУК — регулируемый дроссель в шунтирующей линии (рис. 1). Параметр его настройки — проходное сечение, регулировалось в диапазоне $2{,}5\cdot10^{-7}$до $7{,}5\cdot10^{-7}$ м^2, результаты эксперимента представлены на рис. 7.

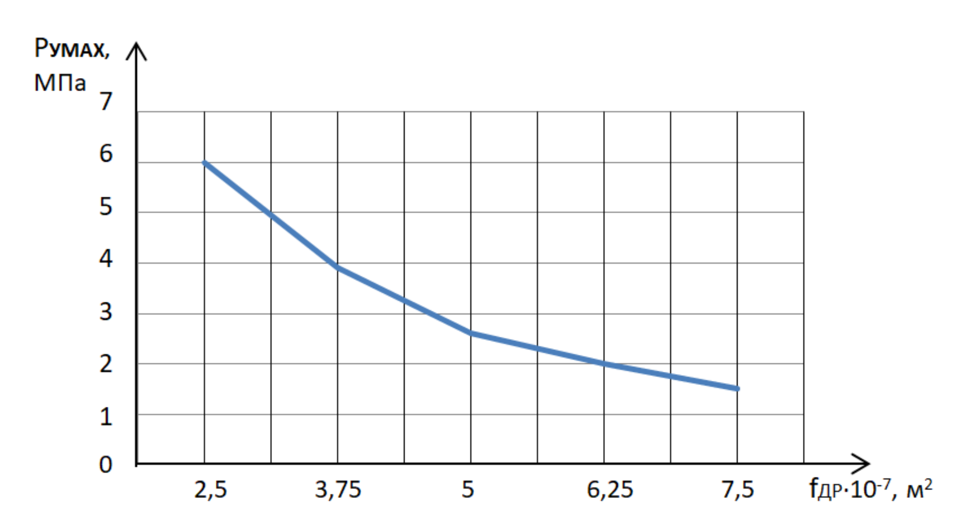


Рис. 7. Зависимость изменения максимального давления управления $P_{у.max}$ от площади проходного сечения дросселя ДР1, аппроксимация: $P_{УМАХ}=1{,}5f_{ДР}^2-27{,}6\cdot f_{ДР}+84{,}2$

Исследовали четыре режима работы двигателя вращения инструмента (гидромотора ГМ1) при релейном нагружении и соответственно изменении угловой скорости ω на: 22 рад/с; 49 рад/с; 71 рад/с и 85 рад/с. Полученная по данным эксперимента зависимость представлена на рис. 8.

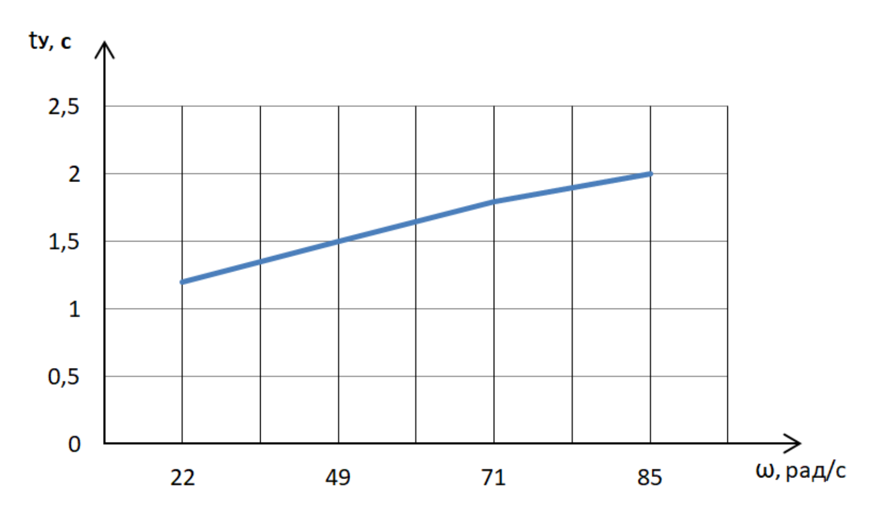


Рис. 8. Зависимость $t_у$ времени отклика КГУ от изменения угловой скорости вращения вала гидромотора ГМ1 ω, аппроксимация: $t_у$=-0,002$ω^2$-0,4ω+0,83

Поскольку КГУ входит в состав гидросистемы МБМ, его протяженность оказывает особое влияние на качество и время переходных процессов [16]. С целью определения степени влияния на вышеназванные параметры, произведены исследования времени изменения давления в линии управления при варьировании ее объема (рис. 9).

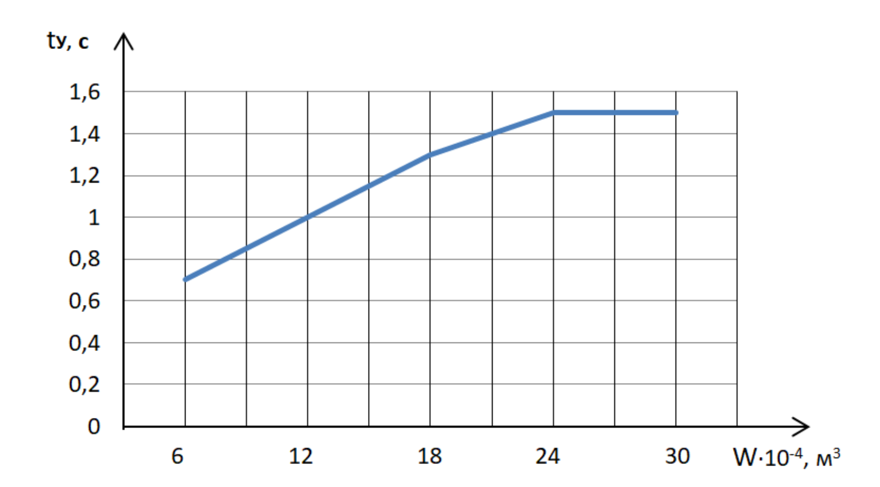


Рис. 9. Зависимость $t_у$ времени отклика КГУ от величины объема W в гидролинии управления, аппроксимация: $t_у$=-0,02$ω^3$+0,1$ω^2$+0,12ω+0,5

Результаты позволяют определить критическое значение объема гидролинии W = 24·10^{-4} $м^3$, свыше которого время реакции КГУ не превышает 1,5 с, что обусловлено волновыми процессами, протекающими по трубопроводу, а также параметрами самих магистралей [20].

Выводы. В результате проведенных исследований были обоснованы требования и предложена обобщенная структура ГМС рабочих движений МБМ, позволившая повысить эффективность бурового производства за счет введения внутренней кинематической гидромеханической связи между главным и движением подачи инструмента.

Разработан и реализован контур гидравлического управления на основе многопараметрического датчика и гидроуправляемого клапана, обеспечивающий согласование рабочих движений при изменяющейся технологической нагрузке. Учитывая характерные особенности технологического процесса бурения, предложена конфигурация опорного рабочего цикла, позволившая разработать автоматизированную систему приводов рабочих движений.

Библиографический список

1. Озерский, А. И. Перспективные направления развития силового гидравлического привода / А. И. Озерский, Ю. И. Бабенков, М. Э. Шошиашвили // Известия высших учебных заведений. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. — 2008. — №6. — С. 55–61.

2. Сысоев, Н. И. Обоснование структуры и рациональных режимных параметров мехатронной бурильной машины / Н. И. Сысоев, С. Г. Мирный, Д. А. Гринько // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 9. — С. 24–28.

3. Муравенко, В. А. Буровые машины и механизмы. Т.1 / В. А. Муравенко, А. Д. Муравенко. — Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. — 520 с.

4. Мирный, С. Г. Обоснование и выбор рациональной частоты вращения штанги машин для сверления шпуров в породах повышенной крепости и абразивности : дис… канд. техн. наук / С. Г. Мирный. — Новочеркасск : НПИ, 2005. — 142 с.

5. Басарыгин, Ю. М., Технология бурение нефтяных и газовых скважин. Учеб. для вузов / Ю. М. Басарыгин. — Москва : Недра-Бизнесцентр, 2001 г. — 679 с.

6. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.

7. Ящерицын, П. И. Теория резания / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. — Москва : Новое знание, 2006. —512с.

8. Ле Чунг Киен. Повышение эффективности гидропривода подачи технологического оборудования : дис…канд. техн. наук / Ле Чунг Киен. — Ростов-на-Дону, 2013. — 165с.

9. Гринько, Д. А. Метод расчета и поддержания рациональных режимных параметров бурильной машины мехатронного класса : дис… канд. техн. наук / Д. А. Гринько. — Новочеркасск, 2015. — 158 с.

10. Установка разведывательного бурения УРБ-2,5С-КАМАЗ. Руководство по эксплуатации УРБ-2,5С.00.00.000 РЭ. Ростов-на-Дону, ООО «Завод СтройНефтеМаш», 2012 г.

11. Сидоренко, В. С. Адаптивный гидропривод с объемным регулированием подачи инструмента технологической машины / В. С. Сидоренко [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — Т17, №2(89). — С. 88–99.

12. Ракуленко, С. В. Адаптивный гидравлический привод подачи инструмента буровой установки / С. В. Ракуленко // Юбилейная конф. студ. и молодых ученых, посв. 85-летию ДГТУ: сб. докл. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 2015 г. — С. 306–318.

13. Сидоренко, В. С. Моделирование гидравлической системы с зависимой подачей инструмента мобильной буровой установки / В. С. Сидоренко [и др.] // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития — 2016: сб. науч. тр. IX междунар. науч.-техн. конф. — Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2016. — С.365–375.

14. Гидравлический датчик : патент 2538071 Рос. Федерация, МПК G01P3/32 / В.С.Сидоренко, С.В. Ракуленко, Ле Чунг Киен. — № 2013126107/28; заявл. 07.06.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. — 8 с.

15. Сидоренко, В. С. Динамика гидромеханической системы технологической машины с адаптивным приводом подачи инструмента / В. С. Сидоренко, С. В. Ракуленко, М. С. Полешкин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2017. — Т.16, №1. — С. 162–175.

16. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп./ Д. Н. Попов. — Москва : Машиностроение, 1987. — 464 с.

17. Мостеллер Фредерик. Анализ данных и регрессия / Фредерик Мостеллер, Джон. У Тьюки; пер. с англ. Ю. Н. Благовещенского; под ред. Ю. П. Адлера. — Москва : Финансы и статистика, 1982. — 258с.

18. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М. Н. Степнов. — Москва : Машиностроение, 1985. — 220 с.

19. Иванов, Г. М. Проектирование гидравлических систем машин / Г. М. Иванов [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1992. — 224 с.

20. Казмиренко, В. Ф. Электрогидравлические мехатронные модули движения. Основы теории и системное проектирование. Учебн. Пособие / В. Ф. Казмиренко. — Москва : Радио и связь, 2001. — 432 с.

Поступила в редакцию 21.12.2018
Сдана в редакцию 23.12.2018
Запланирована в номер 11.01.2019

Received 21.12 .2018
Submitted 23.12.2018
Scheduled in the issue 11.01.2019

Об авторах:

Сидоренко Валентин Сергеевич,
профессор кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5124-6324
v.sidorenko1942@gmail.com

Грищенко Вячеслав Игоревич,
доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1422-2811
vig84@yandex.ru

Ракуленко Станислав Вадимович,
доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8293-0305
rakulenko84@mail.com

Полешкин Максим Сергеевич,
доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5364-1106
poleshkin.maks@gmail.com

Дымочкин Денис Дмитриевич,
доцент кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0717-4348
dydedmi_77_06_02@mail.ru

Authors:

Sidorenko, Valentin S.,
professor of the Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Heat Processes Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5124-6324
v.sidorenko1942@gmail.com

Grishchenko, Vyacheslav I.,
associate professor of the Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Heat Processes Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1422-2811
vig84@yandex.ru

Rakulenko, Stanislav V.,
associate professor of the Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Heat Processes Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8293-0305
rakulenko84@mail.com

Poleshkin, Maxim S.,
associate professor of the Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Heat Processes Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5364-1106
poleshkin.maks@gmail.com

Dymochkin, Denis D.,
associate professor of the Hydraulics, Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Heat Processes Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0717-4348
dydedmi_77_06_02@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.893 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30

Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения*

В. Э. Бурлакова[1], Е. Г. Дроган[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of organic acid concentration in lubricant on tribological characteristics of friction couple***

V. E. Burlakova[1], E. G. Drogan[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованию возможности использования в качестве присадки к смазочной композиции одноосновных карбоновых кислот и изучению их влияния на эволюцию коэффициента трения пары латунь-сталь, а также изучению морфологии формирующихся при трении поверхности пленок.
Целью работы являлось изучение влияния концентрации карбоновых кислот в составе смазочной композиции на эволюцию коэффициента трения пары сплав медь-сталь.
Материалы и методы. Проведены трибологические исследования пары трения латунь-сталь в водных растворах одноосновных карбоновых кислот с концентрациями 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 моль/л. С помощью растровой электронной микроскопии изучена морфология поверхности сервовитной пленки, формирующейся на стальном диске после фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водных растворах кислот с концентрацией 0,1 моль/л.
Результаты исследования. Изучены трибологические характеристики трибосопряжения латунь-сталь в водных растворах карбоновых кислот различной концентрации. Установлена оптимальная концентрация кислоты в составе смазки, при которой в результате трения пары латунь 59-сталь 40Х реализуется избирательный перенос и достигается режим безызносного трения. Обнаружено снижение коэффициента трения до 0,009 и 0,007 при трении в водных растворах валериановой и капроновой кислот соответственно. С помощью растровой электронной микроскопии выявлено формирование на стальной поверхности антифрикционной пленки. Установлено, что пленка, формирующаяся в водном растворе капроновой кислоты, имеет более плотную структуру, в сравнении с пленкой, формирующейся при трении в водных растворах масляной и капроновой кислот.
Обсуждение и заключения. В результате трибологических исследований пары трения латунь-сталь в водных

Introduction. The possibility of using monocarboxylic acids as a lubricant composition additive, and the effect of their concentration in lubricant on the evolution of the friction factor of a brass-steel couple, as well as the morphology of the film surface under friction is considered. The work objective is to study the effect of the concentration of carboxylic acids in the lubricant composition on the evolution of the friction factor of copper – steel alloy.
Materials and Methods. Tribological studies of a brass-steel friction couple in aqueous solutions of monocarboxylic acids with the concentrations of 0.025; 0.05; 0.1; 0.2; 0.5 mol/l are carried out. Using scanning electron microscopy, we have studied the morphology of the servovite film surface that is formed on a steel disk after frictional interaction of a brass-steel couple in aqueous solutions of acids with the concentration of 0.1 mol/l.
Research Results. Tribological characteristics of the brass-steel tribocoupling in aqueous solutions of carboxylic acids of various concentrations are studied. The optimum acid concentration in the lubricant composition is specified. Herewith, a selective transfer and a wearless friction regime are implemented under friction of the brass 59–steel 40X couple. A decrease in the friction ratio to 0.009 and 0.007 is found out under friction in aqueous solutions of valeric and caproic acids, respectively. The formation of an anti-friction film on the steel surface is identified through the scanning electron microscopy. It is established that the film formed in an aqueous solution of caproic acid has a denser structure in comparison with the film formed under friction in aqueous



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: vburlakova@donstu.ru, ekaterina.drogan@gmail.com
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

растворах кислот выявлено, что оптимальной молярной концентрацией кислоты в составе смазки является концентрация 0,1 моль/л. При этой концентрации кислоты достигаются значения коэффициента трения, характерные для режима безызносности. Выявлено, что изменение концентрации кислоты приводит либо к увеличению значений коэффициента трению, либо к незначительному его снижению. При этом увеличение концентрации кислоты сопровождается коррозионными процессами на поверхности пары трения.

solutions of butyric and caproic acids.

Discussion and Conclusions. Thus, the tribological studies of a brass-steel friction couple in aqueous acid solutions show that the optimum molar acid concentration in the lubricant composition is 0.1 mol/l. At this acid concentration, the values of the friction factor characteristic of the wearless mode are attained.

Ключевые слова: коэффициент трения, износ, избирательный перенос, сервовитная пленка, карбоновая кислота, топография поверхности трения.

Keywords: friction factor, wear, selective transfer, servovite film, carboxylic acid, friction surface topography.

Образец для цитирования. Бурлакова, В. Э. Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения / В. Э. Бурлакова, Е. Г. Дроган // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т.19, №1. — С. 24-30. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30

For citation: V.E. Burlakova, E.G. Drogan. Effect of organic acid concentration in lubricant on tribological characteristics of friction couple. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 24-30. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30

Введение. Современная быстроразвивающаяся машиностроительная отрасль промышленности выдвигает новые требования к смазочным материалам. Большинство традиционных методов контроля трения и износа основаны на использовании твердых и жидких смазок [1–4]. Основной функцией смазки в узлах трения является сохранение двух контактирующих поверхностей деталей машин от износа. Для выполнения необходимых функций базовые жидкости нуждаются в модификации функциональными добавками, которые изменяют противоизносные свойства базовых масел путем улучшения, в том числе, и их смазывающей способности. По этой причине присадки являются неотъемлемой частью при конструировании современных смазочных материалов. Проведенные в [2–7] исследования показывают, что для снижения трения и износа в качестве добавок к смазочным композициям используют как наночастицы металлов, так и различные органические компоненты. Одни из них способствуют формированию защитных антифрикционных пленок на поверхностях трибоконтакта благодаря присутствию в составе смазочных композиций порошков металлов с размерами частиц в микро- и нанодиапазоне [7–9], другие — в результате избирательного растворения трибосопряженных поверхностей (в случае пары трения сплав медь-сталь) при трении [10–17]. Важную роль при селективном переносе меди на стальную поверхность при фрикционном взаимодействии, как известно, играет смазочная среда. Учитывая, что при трении, например, сплава меди по стали в водно-глицериновой среде образуются различные полярные соединения, в том числе и карбоновые кислоты. Представлялось интересным изучение возможности использования их в качестве добавок к смазочной композиции для изучения возможности реализации избирательного переноса и безызносного трения.

Материалы и методы. Эволюцию коэффициента трения системы «латунь 59-водный раствор карбоновой кислоты-сталь 40Х» исследовали на торцевой машине трения типа АЕ-5. В качестве смазочной композиции использовали водные растворы одноосновных карбоновых кислот предельного ряда с общей формулой $R–COOH$ $(R = C_nH_{2n+1})$ с концентрациями 0,025–0,5 моль/л. Перед трибологическими исследованиями образцы из стали 40Х и латуни 59 зачищали шлифовальной бумагой, промывали дистиллированной водой, обезжиривали гексаном и высушивали на воздухе. Узел трения представлял собой стальной жестко закрепленный диск и три подвижных пальца из латуни, расположенных по окружности под углом 120° друг относительно друга. В рабочую часть машины трения, изготовленную в виде ванны из текстолита, помещалась в смазочную композицию пара трения из кольцевого стального образца и пальцев из латуни. К внешней стороне рабочей части машины трения крепился датчик силы марки PHYWE Cobra для непрерывного регистрирования изменения силы трения. Трибологические исследования проводились при следующих режимах: скорость скольжения подвижный образцов 0,45 м/с, осевая нагрузка — 1,7 МПа, время испытания — 10 часов. Температура рабочей среды — 37° С. Пройденный путь скольжения — 15 260 м.

Исследования особенностей морфологии сервовитной пленки осуществлялись с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Carl ZEISS в лаборатории «Электронной и оптической микроскопии» (ЭиОМ) и Ресурсном центре коллективного пользования (РЦКП) научно-

образовательного центра (НОЦ) «Материалы» (http://nano.donstu.ru). Исследования проводились в условиях высокого вакуума. Ускоряющее напряжение в режиме сканирования составляло 1–3 кВ.

Результаты исследования. Зависимость коэффициента трения от концентрации карбоновой кислоты при трении пары латунь-сталь для различных объемных концентраций кислоты представлены на рис. 1 и в таблице 1. Из анализа полученных данных следует, что зависимость на рис. 1 является немонотонной, с минимумом концентрации кислоты в растворе 0,1 моль/л.

Таблица 1

Зависимость коэффициента трения от концентрации кислоты в смазке

Смазочная композиция, раствор кислоты	Химическая формула кислоты: *R-COOH*, где *R*	Концентрация кислоты, моль/л				
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,5
		Коэффициент трения, μ				
Муравьиная	*-H*	0,307	0,348	0,274	0,391	0,545
Уксусная	$-CH_3$	0,285	0,312	0,258	0,367	0,462
Пропионовая	$-CH_2CH_3$	0,195	0,129	0,087	0,239	0,335
Масляная	$-CH_2CH_2CH_3$	0,112	0,083	0,037	0,184	0,307
Валериановая	$-CH_2CH_2CH_2CH_3$	0,071	0,031	0,009	0,045	0,154
Капроновая	$-CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$	0,054	0,016	0,007	0,028	0,126

Изучение влияния концентрации кислоты на изменение величины коэффициента трения в растворе показывает, что повышение концентрации муравьиной и уксусной кислот в составе смазочной композиции с 0,025 моль/л до 0,05 моль/л приводит к увеличению кислотности среды и, как следствие, увеличению значений коэффициента трения с 0,3 до 0,35. В результате фрикционного взаимодействия на поверхности металлов в трибосистеме развивается трибокоррозионный процесс. Дальнейшее повышение концентрации кислоты до 0,1 моль/л обнаруживает уменьшение значения коэффициента трения и затем сопровождается его резким увеличением и сильным изнашиванием материалов пар трения в результате адгезионно-механического взаимодействия выступов микрорельефа поверхности (рис. 1, 2).

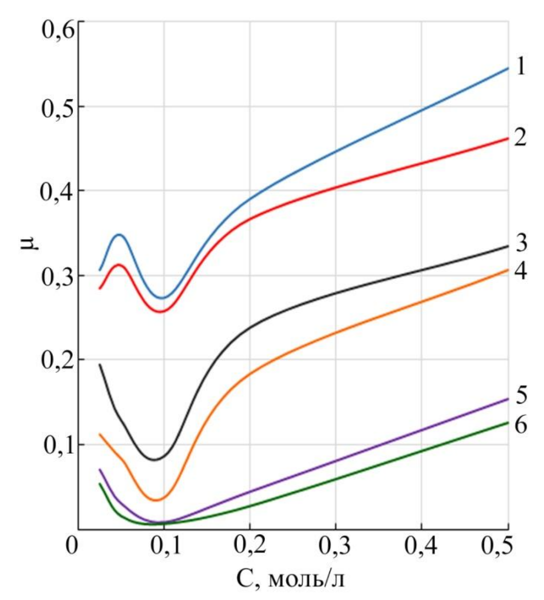


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения (μ) от концентрации кислоты (С) в составе смазочной композиции при трении пары латунь-сталь: 1 — муравьиная, 2 — уксусная, 3 — пропионовая, 4 — масляная, 5 — валериановая, 6 — капроновая

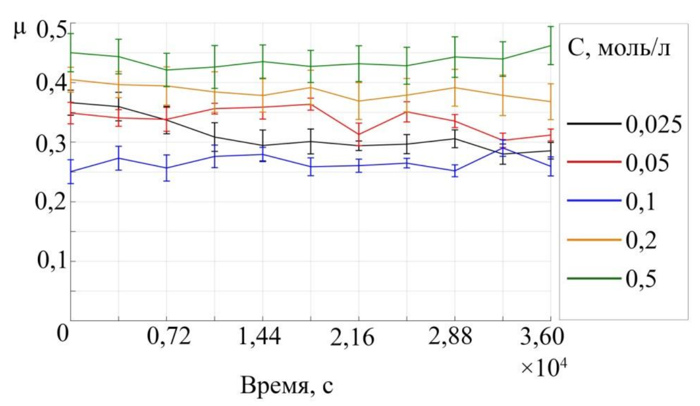


Рис. 2. Эволюция коэффициента трения (μ) от концентрации (С) в системе «латунь-водный раствор уксусной кислоты-сталь»

Аналогичная зависимость коэффициента трения от концентрации кислоты в составе смазки наблюдается и при трении пары латунь-сталь в водных растворах пропионовой и масляной кислот (рис. 3).

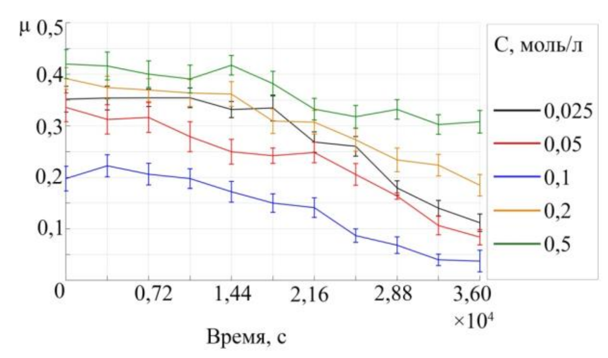


Рис. 3. Эволюция коэффициента трения (μ) от концентрации (С) в системе «латунь-водный раствор масляной кислоты-сталь»

При этом, значение коэффициента трения значительно снижается при концентрации кислоты 0,1 моль/л и не превышает 0,1. Дальнейшее увеличение концентрации кислоты в составе смазки также, как и в случае муравьиной и уксусной кислотами, сопровождается его резким увеличением (рис. 1). В результате в объеме смазочной жидкости образуются продукты износа. Поверхность трения при этом подвергается коррозионно-механическому изнашиванию, а коэффициент трения имеет достаточно высокие значения от 0,15 до 0,35 (рис. 3).

Анализ изменения коэффициента трения пары латунь-сталь в водных растворах валериановой и капроновой кислот с концентрациями 0,025 и 0,05 моль/л выявляет достаточно низкие до 0,07 значения (рис. 1, 4).

Использование валериановой и капроновой кислот в смазочной композиции с концентрацией 0,1 моль/л позволяет достичь наименьших значений коэффициента трения до 0,007, оптимальных условий для самоорганизации на поверхности стали, образованию визуально обнаруживаемой сервовитной пленки [13, 18] и установлению в трибологической системе режима безызносного трения. При этом, снижение коэффициента трения в паре сплав медь-сталь связано с лучшим демпфированием трибопленкой напряжений, вызванных трением.

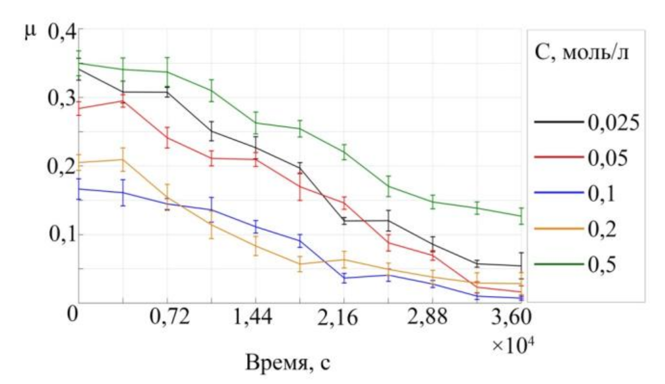


Рис. 4. Эволюция коэффициента трения (μ) от концентрации (С) в системе «латунь-водный раствор капроновой кислоты-сталь»

Трибоэлектрохимические реакции, происходящие в зоне фрикционного контакта в водных растворах валериановой и капроновой кислот, инициируют не только образование сервовитной пленки, способствуя снижению коэффициента трения, залечиванию микродефектов поверхности, но и приводят к интенсификации хемосорбционного взаимодействия, усиливая упорядочивающее действие подложки на ориентацию молекул при формировании адсорбционного слоя из молекул кислоты. Наличие активных полярных групп *–COOH* в молекуле карбоновой кислоты приводит к взаимодействию ее с металлическими поверхностями с образованием химически адсорбированных соединений типа бидентантного лиганда [12]. Алифатические монокарбоновые кислоты *R–COOH* формируют слои, в которых углеводородные радикалы молекул образуют плотноупакованную структуру. Присутствие на поверхности металла адсорбированных молекул карбоновых кислот не только снижает коэффициент трения, по сравнению с чистой поверхностью трения, как следует из полученных результатов, но и повышает его. При очень малых концентрациях кислоты в растворе до 0,05 моль/л степень заполнения адсорбционного слоя очень мала, молекулы не образуют сплошной пленки и свободно перемещаются по поверхности металла. Кроме молекул кислоты на поверхности металла могут адсорбироваться молекулы воды, однако они не обладают эффективным экранирующим действием, поэтому коэффициент трения практически не отличается от значений для чистых поверхностей. С ростом концентрации кислоты в растворе до 0,1 моль/л степень заполнения адсорбированного слоя поверхности трения увеличивается, молекулы кислоты при этом располагаются параллельно поверхности, снижая коэффициент трения, по сравнению со значениями для чистых поверхностей трения. Образующиеся граничные слои при малой концентрации кислоты уменьшают коэффициент трения. При дальнейшем увеличении концентрации кислоты молекулы располагаются перпендикулярно поверхности, адсорбированный слой увеличивает шероховатость поверхности, и коэффициент трения возрастает. Замкнутость межмолекулярных связей внутри адсорбционного слоя приводит к низкой поверхностной энергии и практическому отсутствию вторичной адсорбции кислот или других компонентов [19–21].

Анализ полученных результатов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) указывает на значительные структурные изменения поверхности трения в водных растворах кислот при переходе от муравьиной к капроновой кислоте (рис. 4). Как видно из СЭМ-визуализации полученных результатов, при относительном движении двух поверхностей в водном растворе уксусной и масляной кислот, поверхность трибоконтакта имеет неоднородную структуру, имеющую большое количество пор и неровностей, образующихся в результате механохимической коррозии, а также наличие частиц продуктов износа на поверхности трения, в присутствии которых трущиеся металлы подвергаются абразивному износу. На поверхности трения при этом появляются трещины и царапины, что значительно понижает износостойкость материала. Микрофотографии поверхности образцов после трения в водных растворах уксусной и масляной кислот обнаруживают значительную шероховатость дорожки трения, что приводит к повышению коэффициента трения (рис 4а, б). Увеличение силы трения вызывает также повышение температуры в узле трения, и, как следствие, тепловое напряжение металла, что также является одной из причин образования трещин, как на поверхности материала, так и в его объеме.

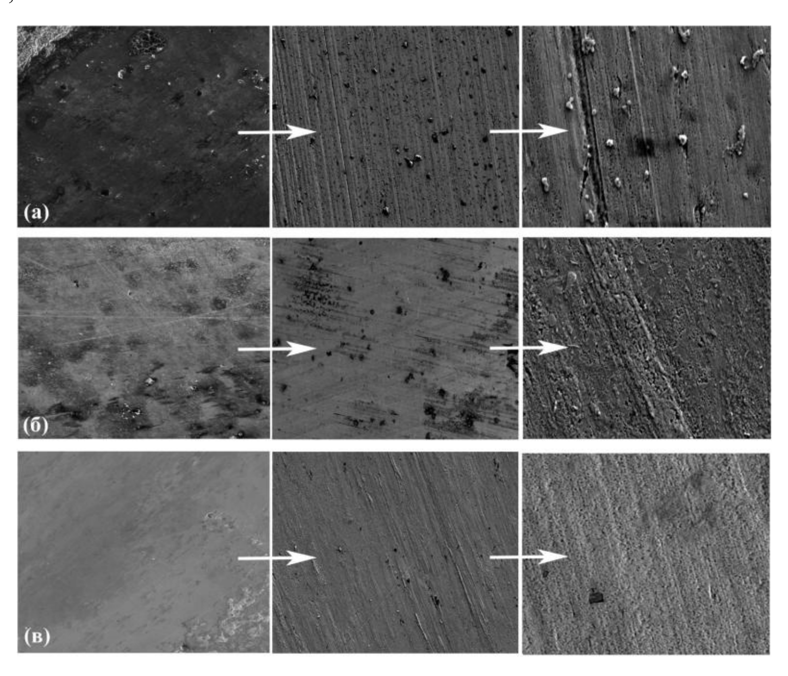


Рис. 5. Результаты СЭМ сервовитной пленки, полученной при трении в системе «латунь-водный раствор кислоты-сталь», а — уксусная, б — масляная, в — капроновая кислоты

При использовании в качестве смазочной композиции водного раствора капроновой кислоты при трении сплава меди по стали наблюдается образование медного неокисляющегося слоя на поверхности стального диска (рис. 4 в) [22]. Такой эффект объясняется каталитическим действием меди, превращающей мономеры смазочного материала в полимеры, обеспечивая сохранение меди в неокисленном состоянии [12]. Медная пленка, формирующаяся при трении в водном растворе капроновой кислоты, имеет плотную структуру с минимальным количеством пор, обеспечивая безызносное трение.

Заключение. В результате трибологических исследований пары трения латунь-сталь в водных растворах кислот обнаружена оптимальная концентрация кислоты в составе смазки. Выявлено, что изменение концентрации кислоты приводит к изменению ее адсорбции на поверхности трения, приводя к изменению морфологии трибосопряженных поверхностей.

Библиографический список

1. Calhoun, S. F. Antiwear and extreme pressure additives for greases, Tribology Transactions, 1960, vol. 3, pp. 208—214. DOI: 10.1080/05698196008972405

2. Ettefaghi, E., Ahmadi, H., Rashidi, A., Mohtasebi, S. S., Alaei, M. Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive, International Journal of Industrial Chemistry, 2013, vol. 4, pp.1–6. DOI: 10.1186/2228-5547-4-28

3. Wu, Y., Tsuia, W., Liub, T. Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives. Wear, 2007, vol. 262, pp. 819–825. DOI: 10.1016/j.wear.2006.08.021

4. Su, F., Chen, G., Huang, P. Lubricating performances of graphene oxide and onion-like carbon as water-based lubricant additives for smooth and sand-blasted steel discs. Friction, 2018, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s40544-018-0237-3

5. Кужаров, А. С. Нанотрибология водных растворов карбоновых кислот при трении бронзы по стали / А. С. Кужаров [и др.] // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии : материалы XI междунар. науч.-техн. форума. — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 712–717.

6. Бурлакова, В. Э. Влияние природы органической компоненты на триботехнические свойства системы «бронза-водный раствор карбоновой кислоты-сталь» / В. Э. Бурлакова [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15,№. 4 (83). — С. 63–68. DOI: 10.12737/16067

7. Yu, H. et al. Tribological properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticles in lubricant. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008. vol. 18, no. 3, pp. 636–641. DOI: 10.1016/S1003-6326(08)60111-9

8. Hu, Z.S, Lai, R., Lou, F., Wang, L., Chen, Z., Chen, G., et al. Preparation and tribological properties of nanometer magnesium borate as lubricating oil additive. Wear, 2002, vol. 252, pp. 370–374. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00862-6

9. Rastogi, R., Yadav, M., Bhattacharya, A. Application of molybdenum complexes of 1-aryl-2,5-dithiohydrazodicarbonamides as extreme pressure lubricant additives. Wear, 2002, vol. 252, no 9–10, pp. 686–692. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00878-X

10. Kragelsky IV, Alisin VV. Friction wear lubrication: tribology handbook. Elsevier; 2016, P. 263.

11. Бурлакова, В. Э. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности. — Изд. центр ДГТУ, 2005. — 211 с.

12. Burlakova, V. E., Milov, A. A., Drogan, E. G. Nanotribology of Aqueous Solutions of Monobasic Carboxylic Acids in a Copper Alloy–Steel Tribological Assembly. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 1108–1116. DOI: 10.1134/S1027451018050427

13. Бурлакова, В. Э. Влияние состава смазочной среды на структуру поверхностных слоев формирующейся при трении сервовитной пленки / В. Э. Бурлакова [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2019. — № 4. DOI: 10.1134/S0207352819040061

14. Myshkin, N. K. Friction transfer film formation in boundary lubrication / N. K. Myshkin. Wear, 2000. vol. 245, Iss. 1-2, pp. 116–124. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00472-5

15. Bulgarevich, S. B. Boiko, M. V., Feizova, V. A., Akimova, E. E. Effect of pressure on chemical reactions in the zone of direct friction contact of systems with selective transfer. Journal of Friction and Wear, 2011, vol. 32, Iss. 3, pp. 145–149. DOI: 10.3103/S1068366611030020

16. Бурлакова, В. Э. Механические свойства сервовитных пленок, формирующихся при трении в водных растворах карбоновых кислот / В. Э. Бурлакова [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, №. 3.— С. 280–288. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-3-280-288

17. Бурлакова, В. Э. Влияние наноразмерных кластеров меди на триботехнические свойства пары трения сталь-сталь в водных растворах спиртов / В. Э. Бурлакова, Ю. П. Косогова, Е. Г. Дроган // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 2(81). — С. 41–47. DOI: 10.12737/11590

18. Бурлакова, В. Э. Трибологические возможности пары трения латунь-сталь в водных растворах органических кислот / В. Э. Бурлакова, Е. Г. Дроган, Д. Ю. Геращенко // Трибология-машиностроению : труды XII междунар. науч.-техн. конф., посвященной 80-летию ИМАШ РАН. — Ижевск, 2018. — С. 92–95.

19. Мухортов, И. В. Полимолекулярная адсорбция смазочных материалов и ее учет в теории жидкостного трения / И. В. Мухортов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2011. — №. 31 (258). — С. 62–67.

20. Буяновский, И. А. Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел / И. А. Буяновскийи, З. В. Игнатьева, В. А. Левченко, В. Н. Матвеенко // Трение и износ. — 2008. — Т. 29, №. 4. — С. 375–381.

21. Новоселова, М. В. Трибологические свойства тонких пленок жирных кислот / М. В. Новоселова, М. П. Вильмс // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика. — 2011. — №. 15. — С. 86–91.

22. Garkunov D. N. Scientific Discoveries in Tribotechnologies. No-wear effect under friction: Hydrogen wear of metals. – 2007.

Поступила в редакцию 12.12.2018
Сдана в редакцию 20.01.2019
Запланирована в номер 20.01.2019

Received 12.12.2018
Submitted 20.01.2019
Scheduled in the issue 20.01.2019

Об авторах:

Бурлакова Виктория Эдуардовна,
заведующий кафедрой «Химия» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3779-7079
vburlakova@donstu.ru

Дроган Екатерина Геннадьевна,
младший научный сотрудник лаборатории «Гибридный функциональные материалы на основе графена» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4002-2082
ekaterina.drogan@gmail.com

Authors:

Burlakova, Victoria E.,
Head of the Chemistry Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID:http://orcid.org/0000-0003-3779-7079
vburlakova@donstu.ru

Drogan, Ekaterina G.,
junior research scholar, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4002-2082
ekaterina.drogan@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.7/9 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-31-37

Особенности формирования композитных электрохимических покрытий на основе никеля и наноструктурного диборида циркония*

Л. А. Дегтярь[1], И. С. Иванина[2], И. Ю. Жукова[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[1]Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Российская Федерация

Formation features of composite electrochemical nickel and nanostructured zirconium boride coatings***

L. A. Degtyar[1], I. S. Ivanina[2], I. Yu. Zhukova[3]**
[1,2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[1]Don State Agrarian University, Persianovsky village, Russian Federation

Введение. Исследован процесс электроосаждения композитных электрохимических покрытий из электролита-коллоида никелирования, содержащего ультрадисперсный порошок диборида циркония.
Цели работы: исследование физико-механических свойств композитов на основе никеля и наноструктурного диборида циркония, а также определение оптимальных условий нанесения такого электрохимического покрытия.
Материалы и методы. Микротвердость композитных электрохимических покрытий измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3 на образцах с толщиной слоя 30 мкм при нагрузке на индентор 100 г. Для определения износостойкости покрытий использовали трехшариковую машину трения. Испытания образцов проводили в режимах сухого трения и с применением 3 % смазочно-охлаждающей жидкости РВ. Значения диаметра пятна износа измерили под микроскопом МИР-3 ТУ 3-3.1954-86. Для определения внутренних напряжений в покрытии воспользовались методом гибкого катода в соответствии с ГОСТ 9.302-88.
Результаты исследования. Разработан состав электролита-коллоида и режимы электроосаждения композитных покрытий никель — наноструктурный диборид циркония. Проведен анализ физико-механических свойств (микротвердость, износостойкость и внутренние напряжения) полученных композитных электрохимических покрытий. Сформулированы рекомендации по использованию разработанного электролита и нанесению композитного покрытия на детали машин для их поверхностного упрочнения.
Обсуждение и заключение. КЭП $Ni–ZrB_2$ имеет высокую микротвердость (10–11 гПа при нагрузке на индентор 100 г), что превышает микротвердость чистого никеля в 1,5–2 раза. При возрастании микротвердости снижаются внутренние напряжения КЭП $Ni–ZrB_2$. Предлагаемые покрытия сравнивались с хромовыми, осаждаемыми из экологически опасных электролитов. Износостойкость КЭП

Introduction. The electrodeposition of composite electrochemical coatings from electrolyte-colloid nickel plating containing ultradisperse zirconium boride powder is studied. The work objectives are as follows: to study mechanical-and-physical properties of the composites based on nickel and nanostructured zirconium boride, and to determine optimal conditions for the application of such electrochemical coatings.
Materials and Methods. Microhardness of composite electrochemical coatings was measured using PMT-3 microhardness tester on samples with the layer thickness of 30 μm under the indentation load of 100 g. A three-ball machine was used to determine wear resistance of the coatings. Sample tests were carried out under dry friction modes and with the use of 3% RV coolant. WSD values were measured by MIR-3 TU 3-3.1954-86 microscope. To determine the internal stresses in the coating, we used a flexible cathode method up to GOST 9.302-88.
Research Results. The electrolyte-colloid composition and modes of electrodeposition of composite nickel - nanostructured zirconium boride coatings are developed. Mechanical-and-physical properties (microhardness, wear resistance and internal stresses) of the obtained composite electrochemical coatings are analyzed. Recommendations for use of the developed electrolyte and the application of a composite coating on machine parts for their surface hardening are formulated.
Discussion and Conclusions. $Ni–ZrB_2$ CEC (composite electrochemical coating) has high microhardness (10–11 hPa at the indentation load of 100 g), which exceeds the microhardness of pure nickel by 1.5–2 times. As the microhardness increases, the internal stresses of $Ni–ZrB_2$ CEC decrease. The proposed coatings were compared to chromium ones deposited from the environmentally hazardous electrolytes. The wear resistance of



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: degtiar@yandex.ru, i.ivanina96@mail.ru, iyuzh@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

$Ni–ZrB_2$ в 2–5 раз больше, чем у хромовых покрытий. Таким образом, рекомендуется вместо хромовых покрытий использовать предлагаемый состав для поверхностного упрочнения деталей специальной техники и промышленного оборудования.

$Ni–ZrB_2$ CEC is 2–5 times higher than that of chromium coatings. Thus, instead of chromic coatings, it is recommended to use the proposed composition for surface hardening of parts of the specialty machinery and industrial equipment.

Ключевые слова: электролит, композитное электрохимическое покрытие, никель, диборид циркония, микротвердость, износостойкость, внутренние напряжения.

Keywords: electrolyte, composite electrochemical coating, nickel, zirconium boride, microhardness, wear resistance, internal stresses.

Образец для цитирования: Особенности формирования композитных электрохимических покрытий на основе никеля и наноструктурного диборида циркония / Л. А. Дегтярь [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 31–37 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-31-37

For citation: L.A. Degtyar, et al. Formation features of composite electrochemical nickel and nanostructured zirconium boride coatings. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 31–37. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-31-37

Введение. Композитные материалы широко используются для упрочения поверхности типовых узлов и деталей нефтегазопромыслового, перерабатывающего и другого промышленного оборудования. В результате сочетания (композиции) разнородных веществ появляется новый материал, характеристики которого отличаются от свойств составляющих его компонентов [1].

Для улучшения эксплуатационных свойств гальванопокрытий в раствор вводятся дисперсные наполнители. Таким образом получается композитное электрохимическое покрытие (КЭП) с матрицей из основного металла. Именно создание КЭП является одним из актуальных направлений современной гальванотехники. Для получения КЭП дисперсные частицы различных размеров и видов из электролитов соосаждаются одновременно с металлами. Эти частицы включаются в покрытия, существенно улучшают их эксплуатационные свойства (твердость, износостойкость, коррозионную устойчивость) и придают им новые качества (антифрикционные, магнитные, каталитические).

Известны различные технологии получения КЭП на основе никеля [2–5]. Выбор технологии определяется условиями эксплуатации композитного покрытия (КП). При этом многообразие наполнителей для получения покрытий, обладающих определенными эксплуатационными свойствами, усложняет выбор дисперсных частиц [3, 5–9]. В [2, 3, 6–8, 10] рассмотрены физико-механические свойства различных КП на основе никеля с дисперсными наполнителями (например, наноуглеродный материал «Таунит», оксид алюминия, карбид кремния, графит и т. п.). В указанных работах, в частности, отмечено, от чего зависят структурные и морфологические характеристики КЭП [7–9], их устойчивость к коррозии [7, 11], коэффициент трения скольжения [8], жаростойкость, микротвердость и др. свойства [11]. В качестве определяющих факторов названы условия и режимы осаждения КП, состав электролитов, природа и степень дисперсности порошковых или иных материалов-добавок. Использование микропорошков с величиной зерна более 1 мкм и ультрадисперсных порошков или суспензий может изменить характер соосаждения частиц с выделяемым металлом, а, следовательно, и характеристики КЭП [9]. В присутствии дисперсной фазы свойства электролитов и покрытий из них получают ряд преимуществ [12, 13, 14], важных с точки зрения практического применения.

Интерес представляют никелевые КП, получаемые из электролитов, с добавками на основе диоксида циркония для улучшения морфологии поверхности, микротвердости, жаростойкости и других свойств [5, 15]. Диборид циркония (ZrB_2) в качестве добавки в электролиты для получения КП не исследовался. Однако известно, что соединения циркония и бора значительно улучшают механические и технологические свойства гальванических покрытий [16]. Целью настоящей работы является исследование физико-механических свойств КЭП на основе никеля и наноструктурного ZrB_2, а также определение оптимальных условий его нанесения.

Материалы и методы. Для изготовления электролитов использовались реактивы фирмы *Aldrich* и дистиллированная вода. Содержание ZrB_2 в покрытии определялось весовым (гравиметрическим) методом. Микротвердость КЭП измерялась микротвердомером ПМТ-3. Для этого использовались образцы с толщиной слоя 30 мкм при нагрузке на индентор 100 г. Выход по току покрытий получен с помощью медного кулонометра. Износостойкость покрытий определялась на трехшариковой машине трения. Образцы испытывались в режимах сухого трения и с применением 3 % смазочно-охлаждающей жидкости РВ [17]. Износостойкость КЭП исследовалась следующим образом. На шарики из стали ШХ 15 площадью 0,05 $дм^2$ наносили покрытия толщиной 30 мкм. Контртелом служили шайбы из стали марки Ст 45. Значения диа-

метра пятна износа измеряли при помощи микроскопа МИР-3 ТУ3-3.1954-86. Для определения внутренних напряжений в покрытии воспользовались методом гибкого катода в соответствии с ГОСТ 9.302-88.

Результаты исследования. Изучены процесс электроосаждения и некоторые свойства КЭП с ультрадисперсным порошком (УДП) ZrB_2 (0,04–0,06 мкм). Создание на основе никеля КЭП, имеющих определенные физико-механические характеристики, требует учета ряда факторов. В данном случае в первую очередь принимается во внимание перспектива взаимодействия дисперсной фазы, заранее введенной в электролит, и коллоидных частиц, образующихся в растворе в процессе электролиза или при приготовлении электролита [12, 13].

Для исследований использовали сульфатно-хлоридный электролит-коллоид никелирования следующего состава, г/л: сульфат никеля — 250, хлорид никеля — 60, α-аминоуксусная кислота — 20. Концентрацию ZrB_2 варьировали в пределах от 1 до 60 г/л.

Выявлены оптимальные условия электролиза в присутствии УДП ZrB_2. С этой целью определены интервалы значений катодной плотности тока и pH электролита, в которых образуется КЭП хорошего качества. В составе исследуемого электролита в качестве буферной добавки присутствовала α-аминоуксусная кислота. Ее максимальные буферные свойства проявлялись при pH 2–2,5: в этом случае образовались светло-матовые покрытия хорошего качества. Наличие эффективной буферной добавки в электролите позволяет вести электролиз при высокой катодной плотности тока.

Если в электролите отсутствует ZrB_2, то предельное значение катодной плотности тока составляет 2 А/дм^2. При превышении этого показателя на исследуемых образцах образуется темный контур. Это указывает на подщелачивание в прикатодном слое, образование гидроксида никеля в грубодисперсной форме и включение его в покрытие [12]. В данном случае ухудшаются физико-механические свойства осадков, увеличивается их хрупкость, по краям катода наблюдается растрескивание покрытия.

Введение УДП ZrB_2 в электролит существенно влияет на величину предельного значения плотности тока. Осадки хорошего качества образуются выше допустимой плотности тока, характерной для исследуемого электролита без добавки ZrB_2. В опытах покрытия без темного контура получены при 3; 4; 6 и 8 А/дм^2. При плотности тока выше 4 А/дм^2 на углах катода образовались дендриты. Их появление означает, что лимитирующей стадией процесса является доставка ионов никеля [12]. Концентрационная поляризация устраняется при увеличении концентрации соли никеля в электролите. При концентрации сульфата никеля 300 г/л и высоких плотностях тока дендриты на катоде не образовались.

Изменение величины выхода по току покрытия в зависимости от катодной плотности тока обусловлено появлением дендритов на катоде. С увеличением плотности тока выход по току растет, достигает максимального значения при 3 А/дм^2, а затем резко снижается (рис. 1).

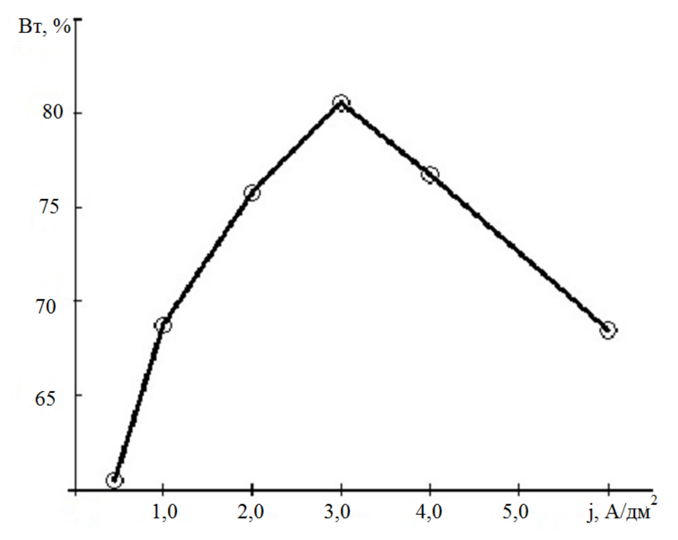


Рис. 1. Зависимость выхода по току КЭП Ni–ZrB_2 от катодной плотности тока. Концентрация порошка в электролите — 40 г/л; температура электролита — 50 °C; pH 2

При промывке образцов дендриты частично утрачиваются, в результате снижаются значения выхода по току покрытия при плотности тока выше 4 А/дм^2. Эффект увеличения верхнего значения плотности тока в присутствии ZrB_2 можно объяснить высокой степенью его дисперсности. Размер частиц порошка соизмерим с толщиной двойного электрического слоя, поэтому при движении частиц у поверхности катода они могут попадать в зону двойного слоя. В этом случае в прикатодном слое в перемешивании электролита

участвуют коллоидные соединения никеля. Они образуются в электролите во время приготовления и электроосаждения, а в процессе электролиза предотвращают резкое подщелачивание.

Буферная емкость электролита при добавке ZrB_2 остается практически неизменной. Значение pH в прикатодном слое, по-видимому, снижается за счет поступления новых порций ZrB_2 из объема электролита. Вероятность этого явления подтверждается тем, что верхнее значение рабочей плотности тока не увеличивается в присутствии микропорошков ZrB_2 (5 мкм) в электролите аналогичного состава.

Оптимальная концентрация ZrB_2 в электролите определялась по его содержанию в покрытии и по значениям микротвердости КЭП. Установлено, что в исследуемом КЭП содержание ZrB_2 достигает максимума (1,1 масс. %) при его концентрации в электролите 40–60 г/л. С увеличением катодной плотности тока при всех исследованных концентрациях добавки ZrB_2 в электролит содержание ZrB_2 в КЭП возрастает до максимального предела (1,1 масс. %). КЭП со стабильными характеристиками по микротвердости образуется при концентрации ZrB_2 в электролите 30–40 г/л. Из экономических и технологических соображений концентрация порошка не должна превышать 40 кг/м^3. В противном случае:
— снижается эффективность перемешивания электролита,
— сложно исключить наличие частиц на труднодоступных для циркуляции электролита участках поверхности детали,
— ухудшается качество покрытий.

Рассмотрена зависимость содержания ZrB_2 в КЭП от концентрации его в электролите. Показано, что при концентрации частиц ZrB_2 10 г/л с величиной зерна 2–9 мкм расстояние между частицами ZrB_2 в покрытии составляет приблизительно 1/3 от расстояния между частицами в электролите. При увеличении концентрации ZrB_2 в 10–20 раз расстояние между частицами в электролите уменьшается, а в покрытии остается практически без изменений. Концентрация ZrB_2 в электролите может быть значительно уменьшена, а в покрытии содержание частиц не снизится. Таким образом, использование электролитов с высокой концентрацией ZrB_2 нецелесообразно, так как максимальное содержание ZrB_2 в покрытии достигается при более низкой его концентрации в электролите.

Микротвердость КЭП с ZrB_2 повышается с увеличением концентрации порошка в электролите. Наибольшего значения (11 ГПа) она достигает при концентрации УДП ZrB_2 50–60 г/л и плотности тока 5–6 А/дм^2. При низких плотностях тока (0,5 А/дм^2 и 1 А/дм^2) микротвердость постепенно возрастает с увеличением концентрации второй фазы. При плотностях тока выше 2 А/дм^2 микротвердость КЭП резко увеличивается и уже при концентрации ZrB_2 1 г/л превышает микротвердость чистого никеля в 1,5–2 раза.

Увеличение микротвердости КЭП в присутствии ультрадисперсной второй фазы объясняется не только включением твердых и коллоидных частиц никеля в покрытие, но и уменьшением кристаллического зерна при высоких плотностях тока, а также дисперсионным твердением никелевой матрицы. Существует мнение, что необходимым условием проявления дисперсионного твердения покрытия является наличие в нем ультратонких частиц, которые препятствуют рекристаллизации и образованию грубых зерен [18]. С одной стороны, частицы с размером субмикронного порядка подавляют рост кристаллических зерен, с другой — они образуют в электролите агломераты и не могут внедряться в покрытие как отдельные частицы. По-видимому, какая-то часть второй фазы включается в осадок (КЭП) в виде индивидуальных частиц и способствует образованию мелкокристаллической структуры никелевой матрицы с высокой твердостью. Вероятность указанного явления нельзя отрицать хотя бы по той причине, что частицы одинаковой природы, отличающиеся степенью дисперсности, проявляют различную способность к увеличению микротвердости КЭП.

Возможность получения КЭП с низким содержанием второй фазы и высокой твердостью приобретает особое значение для увеличения износостойкости поверхности, так как матрица в этом случае должна обладать определенной эластичностью. Значительное увеличение объемного содержания твердых частиц обусловливает хрупкость материалов. Таким образом, применение УДП для получения износостойких покрытий продиктовано практикой. Немаловажное значение имеет снижение расхода второй фазы, а, следовательно, экономичность процесса.

Известно, что твердость покрытий позволяет косвенно судить о некоторых физико-механических свойствах КЭП. В ряде случаев она удовлетворительно коррелирует с износостойкостью [4]. Однако максимальная микротвердость не всегда соответствует высокой износостойкости. Последняя зависит от взаимодействия различных факторов процесса, а также от конкретных условий трения. Поэтому износостойкость КЭП с ZrB_2 сравнивалась с хромовыми гальваническими покрытиями, традиционно применяемыми в качестве износостойких [19]. При этом рассматривались режимы трения со смазкой и без смазки. Согласно

полученным результатам, срок службы деталей с покрытием $Ni–ZrB_2$ в 2–5 раз больше, чем у деталей с твердым хромовым покрытием.

Внутренние напряжения композиционных покрытий $Ni–ZrB_2$ снижаются с увеличением концентрации ZrB_2 в электролите и толщины покрытия. Различия в значениях внутренних напряжений никелевых КЭП растут с увеличением толщины осадка (рис. 2).

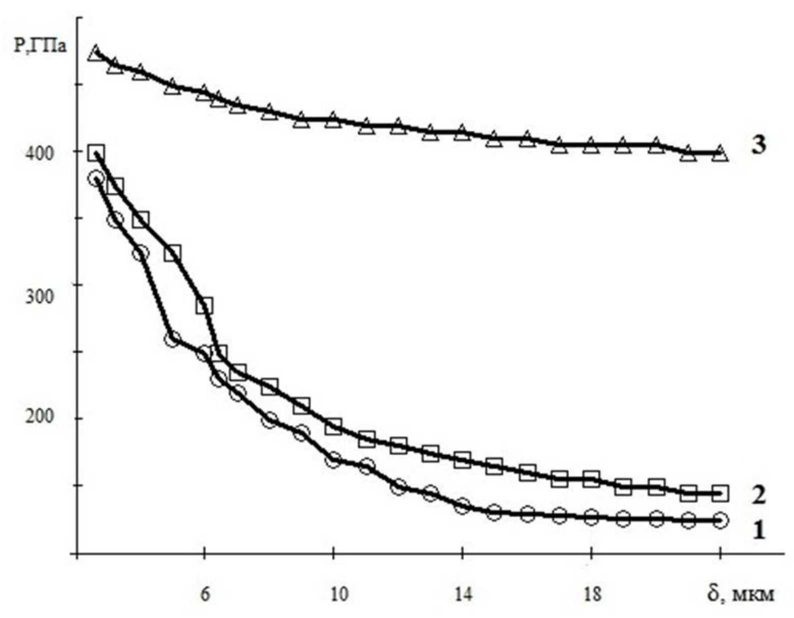


Рис. 2. Зависимость внутренних напряжений от толщины покрытия и концентрации диборида циркония в электролите, г/л: 1 — 30; 2 — 5; 3 — без второй фазы. Катодная плотность тока — 2 А/дм^2; температура электролита — 50 °С; рН 2

Для гальванических покрытий характерна закономерность: чем мельче кристаллическое зерно и выше твердость, тем больше величина внутренних напряжений. В присутствии ZrB_2 микротвердость покрытий резко возрастает, а внутренние напряжения снижаются. Для объяснения этого несоответствия общей закономерности необходимо учесть влияние частиц второй фазы (частиц УДП ZrB_2 и коллоидных частиц, образующихся в электролите) на степень наводороживания осадка. На частицах второй фазы разряд ионов водорода (и, соответственно, более полное удаление молекулярного водорода) происходит быстрее, чем на поверхности никеля, поэтому степень наводороживания осадка снижается, что приводит к снижению внутреннего напряжения покрытия.

Обсуждение и заключения. Таким образом, авторы представленной работы предлагают следующий состав сульфатно-хлоридного электролита-коллоида никелирования для нанесения КЭП на основе никеля и наноструктурного ZrB_2, г/л: сульфат никеля — 250; хлорид никеля — 60; α-аминоуксусная кислота — 20; УДП ZrB_2 — 30–40. Режим электролиза: катодная плотность тока — 2–4 А/дм^2; рН электролита — 2–2,6; температура — 50 °С; в процессе электролиза необходимо перемешивать электролит.

Разработан состав электролита и установлен технологический режим для нанесения КЭП на основе никеля с добавкой ZrB_2. Исследованы физико-механические свойства полученного КЭП $Ni–ZrB_2$: микротвердость, износостойкость и внутренние напряжения.

КЭП имеет высокую микротвердость (10–11 ГПА при нагрузке на индентор 100 г), что превышает микротвердость чистого никеля в 1,5–2 раза. Износостойкость в 2–5 раз больше, чем у хромовых покрытий. При возрастании микротвердости снижаются внутренние напряжения КЭП $Ni–ZrB_2$.

Учитывая перечисленные параметры, предлагаемый метод может использоваться для поверхностного упрочнения деталей специальной техники и промышленного оборудования.

Библиографический список

1. Целуйкин, В. Н. Композиционные электрохимические покрытия: получение, структура, свойства / В. Н. Целуйкин // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 287–301.

2. Композиционные электрохимические покрытия на основе никеля / Г. И. Десяткова [и др.] // Защита металлов. — 2002. — Т. 38, № 5. — С. 525–529.

3. Овчаренко, О. А. Электроосаждение и физико-механические свойства композиционных покрытий $Ni–Al_2O_3$ / О. А. Овчаренко, Н. Д. Сахненко, М. В. Ведь // Современные методы в теоретической и экс-

периментальной электрохимии : тезисы докл. VII Междунар. науч. конф. — Иваново : Ин-т химии растворов им. Г. А. Крестова, 2015. — С. 159.

4. Дегтярь, Л. А. Физико-механические характеристики композиционных электрохимических покрытий на основе никеля / Л. А. Дегтярь // Инновационные пути развития АПК: проблемы и перспективы : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. — Персиановский : ДГАУ, 2013. — Т. 1. — С. 13–14.

5. Fabrication and characterization of Ni-ZrO_2 composite nano-coatings by pulse electrodeposition/ W. Wang [et al.] // Scripta Materialia. — 2005. — P. 613–618.

6. Разработка технологии получения наномодифицированных гальванических покрытий / Ю. В. Литовка [и др.] // Покрытия и обработка поверхности : 7-я междунар. конф. — Москва : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2010. — С. 55.

7. Haghmoradi, N. The correlation among deposition parameters, structure and corrosion behaviour of ZnNi/nano-SiC composite coating deposited by pulsed and pulsed reverse current / N. Haghmoradi, C. Dehghanian, H. Khanlarkhani // Transactions of the IMF. — 2018. — Vol. 96. — P. 155–162.

8. Целуйкин, В. Н. Трибологические свойства композиционных электрохимических покрытий на основе никеля / В. Н. Целуйкин // Трение и износ. — 2010. — Т. 31, № 5. — С. 475–478.

9. Композиционное электрохимическое покрытие : патент 2048573 Рос. Федерация : МПК С22С 19/03А / Л. А. Дегтярь, И. Д. Кудрявцева, Г. Н. Сысоев ; Новочеркасский политехнический институт. — № 5020525/02 ; заявл. 01.03.1992 ; опубл. 20.11.1995, Бюл. № 21 (51). — 4 с.

10. Новоторцева, И. Г. О свойствах композиционных покрытий на основе никеля / И. Г. Новоторцева, Т. В. Гаевская // Журнал прикладной химии. — 1999. — Т. 72, № 5. — С. 789–791.

11. Композиционные покрытия с различной металлической матрицей / Г. Г. Мингазова [и др.] // Вестник Казан. технологич. ун-та. — 2012. — Т. 12, № 20. — С. 81–83.

12. Кудрявцева, И. Д. Электроосаждение металлов из электролитов-коллоидов / И. Д. Кудрявцева, Ф. И. Кукоз, В. И. Балакай // Итоги науки и техники. — (Электрохимия). — 1990. — Т. 33 — С. 50–85.

13. Electrodeposition from Colloid-electrolyte bath: Some new features [Электронный ресурс] / L. A. Degtyar [et al.] // 50 ISE Conference, Pavia (Italy), 5–10 September, 1999 // Russian Journal of Electrochemistry. — Режим доступа: https://link.springer.com/journal/11175 (дата обращения 06.02.19).

14. Композиционные электрохимические покрытия на основе никеля / Р. Е. Фомина [и др.] // Вестник Казан. технологич. ун-та. — 2018. — Т. 21, № 2. — С. 70–73.

15. Горелов, С. М. Получение и свойства композиционного покрытия на основе никеля с наноразмерным диоксидом циркония / С. М. Горелов, Т. Е. Цупак, О. В. Яровая // Гальванотехника и обработка поверхности. — 2014. — Т. 22, № 4. — С. 32–36.

16. Рогожин, В. В. Особенности катодного осаждения никель-борных покрытий из сернокислого электролита с добавками полиэдрических боратов / В. В. Рогожин // Журнал прикладной химии. — 2008. — Т. 84, № 5. — С. 757–760.

17. Шульга, Г. И. Влияние водорастворимых смазочных материалов на самоорганизацию трибосопряжений при ротационной вытяжке листовых сталей / Г. И. Шульга, А. Я. Гоголев, В. П. Афонин // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. — 1999. — № 4. — С. 28–32. — (Технические науки).

18. Мартин, Дж. Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов / Дж. Мартин. — Москва : Металлургия, 1983. — 167 с.

19. Восстановление изношенных изделий сельскохозяйственной техники гальваническим хромированием / Н. Ю. Стекольникова [и др.] // Вестник Тамбов. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 22, № 4. — С. 679–686.

Поступила в редакцию 02.11.2018
Сдана в редакцию 02.11.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 02.11 .2018
Submitted 02.11.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторах:

Дегтярь Людмила Андреевна,
доцент кафедры «Химические технологии нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Донского государственного аграрного университета (РФ, 346495, Ростовская область, Октябрьский (с) район, пос. Персиановский, ул. Кривошлыкова, 24), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7018-6483
degtiar@yandex.ru

Иванина Инна Сергеевна,
магистрант кафедры «Химические технологии нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4635-3464
i.ivanina96@mail.ru

Жукова Ирина Юрьевна,
заведующий кафедрой «Химические технологии нефтегазового комплекса» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9902-3821
iyuzh@mail.ru

Authors:

Degtyar, Ludmila A.,
associate professor of the Chemical Technologies of Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), associate professor of the Natural Sciences Department, Don State Agrarian University (24, Krivoshlykova St., Persianovaky vill., Rostov Region, 346495, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7018-6483
degtiar@yandex.ru

Ivanina, Inna S.,
graduate student of the Chemical Technologies of Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4635-3464
i.ivanina96@mail.ru

Zhukova, Irina Yu.,
Head of the Chemical Technologies of Oil and Gas Complex Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9902-3821
iyuzh@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62.752; 621.534; 629.4.015 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-38-44

Динамическое гашение колебаний при введении дополнительных связей и внешних воздействий*

С. В. Елисеев[1], А. С. Миронов[2], К. Ч. Выонг[3]**
[1,2,3] Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Dynamic damping under introduction of additional couplings and external actions***

S. V. Eliseev[1], A. S. Mironov[2], Quang Truc Vuong[3]**
[1,2,3] Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Введение. Рассматриваются особенности динамических взаимодействий в механических колебательных системах, в структуре которых имеются дополнительные связи. Практически такие ситуации возникают при использовании в формировании технических объектов различных дополнительных механизмов и устройств для преобразования движения. Цель исследования заключается в разработке метода построения математических моделей в задачах динамики механических колебательных систем с дополнительными устройствами и особенностями в системе внешних возмущающих факторов.

Методы, используемые для исследования свойств систем и изучения динамических эффектов, основаны на идеях структурного математического моделирования. Полагается, что механической колебательной системе, рассматриваемой в качестве расчетной схемы технического объекта, можно сопоставить эквивалентную в динамическом отношении систему автоматического управления. Используется математический аппарат теории автоматического управления.

Результаты исследования. Разработан метод построения математических моделей. Получены необходимые аналитические соотношения для построения частотных диаграмм колебательных систем, позволяющие сформировать методологическую основу для интегральной оценки и сравнительного анализа свойств исходных систем в различных динамических состояниях. Проведены исследования динамических свойств систем с двумя степенями свободы в рамках вычислительного моделирования. Доказаны возможности реализации в механических колебательных системах режимов динамического гашения колебаний одновременно по двум координатам при совместном действии двух синфазных кинематических возмущений.

Обсуждение и заключения. Отмечены возможности проявления новых динамических эффектов, которые связаны с изменением структуры системы при

Introduction. The dynamic interaction features in mechanical oscillating systems, whose structure includes additional couplings, are considered. In practice, such cases occur when using various optional mechanisms and motion translation devices under the formation of technical objects. The study objective is to develop a method for constructing mathematical models in the problems of dynamics of the mechanical oscillating systems with optional devices and features in the system of external disturbing factors.

Materials and Methods. The techniques used to study properties of the systems and the dynamic effects are based on the ideas of structural mathematical modeling. It is believed that the mechanical oscillating system, considered as a design model of a technical object, can be compared to the dynamically equivalent automatic control system. The mathematical apparatus of the automatic control theory is used.

Research Results. A method for constructing mathematical models is developed. The essential analytical relations for plotting oscillating systems are obtained, which enable to form a methodological basis for the integral estimation and comparative analysis of the initial system properties in various dynamic states. Dynamic properties of the two-degree-of-freedom systems within the framework of the computer simulation are investigated. The implementability of dynamic oscillation damping mode simultaneously in two coordinates with the joint action of two in-phase kinematic perturbations in the mechanical oscillating systems is shown.

Discussion and Conclusions. The possibilities of new dynamic effects, which are associated with the change in the system structure under certain forms of dynamic interactions, are

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: eliseev_s@inbox.ru, art.s.mironov@mail.ru, trucvq1990@gmail.com
*** The research is done within the frame of independent R&D.

определенных формах динамических взаимодействий. Работа представляет интерес для специалистов в области динамики машин, робототехники, мехатроники, нано- и мезомеханики.

noted. The study is of interest to experts in machine dynamics, robotics, mechatronics, nano and mesomechanics.

Ключевые слова: структурные схемы,передаточные функции, частотные диаграммы, динамическое гашение колебаний, дополнительные связи, совместные взаимодействия.

Keywords: structure diagrams, transfer functions,frequency plots, dynamic damping, additional couplings, joint interactions.

Образец для цитирования: Елисеев, С. В. Динамическое гашение колебаний при введении дополнительных связей и внешних воздействий / С. В. Елисеев, А. С. Миронов, К. Ч. Выонг // Вестник гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 38–44. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-38-44

For citation: S.V. Eliseev, et al. Dynamic damping under introduction of additional couplings and external actions. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 38–44. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-38-44

Введение. Динамическое гашение колебаний достаточно широко применяется на практике для изменения состояний технических объектов и локального влияния на формы взаимодействия элементов механических колебательных систем. В работах [1–3] рассмотрены особенности подходов к реализации режимов динамического гашения колебаний, предложены варианты конструктивно-технических решений и технологии расчета параметров систем.

Разнообразие задач динамики предопределяет широкую вариативность предлагаемых решений, в рамках которых учитываются динамические особенности защищаемых объектов, условия внешних возмущений исходной системы и конструктивно-технические режимы динамического гашения колебаний [4–8].

Динамическое гашение колебаний находит применение в задачах защиты приборного оборудования и аппаратуры [9, 10]. Однако в постановках задач исследования и расчета параметров динамических гасителей колебаний некоторые аспекты оценки динамических свойств систем вибрационной защиты не получили должного уровня и детализации представлений. Это может быть связано с введением и использованием дополнительных связей, учетом особенностей внешних воздействий, а также с учетом влияния одновременного совместного действия нескольких внешних возмущающих факторов.

В настоящей работе развивается метод построения математических моделей и формирования эффектов динамического гашения колебаний в цепных механических колебательных системах с двумя степенями свободы.

I. Некоторые общие положения. Исходная система приведена на рис. 1 и представляет собой два инерционных элемента m_1 и m_2, которые связаны между собой упругими элементами с жесткостями k_1, k_2, k_3 и дополнительными связями в виде устройств для преобразования движения (УПД) с приведенными массами L_1, L_2, L_3. Система совершает малые колебания под действием внешних синфазных гармонических воздействий. Силы сопротивления не учитываются.

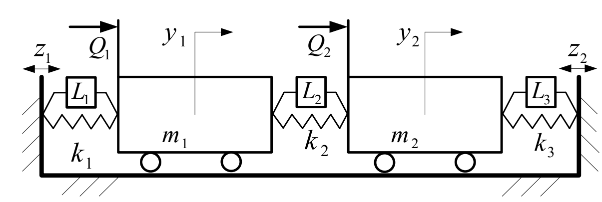


Рис. 1. Принципиальная схема технического объекта в виде системы с двумя степенями свободы с сосредоточенными параметрами

Для описания движения используется система координат y_1, y_2 в неподвижном базисе. Полагаем, что кинетическая и потенциальная энергии системы определяются выражениями:

$$\mathrm{T} = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}L_1(\dot{y}_1 - \dot{z}_1)^2 + \frac{1}{2}L_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2}L_3(\dot{y}_2 - \dot{z}_2)^2, \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1(y_1 - z_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_3(y_2 - z_2)^2. \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений движения системы во временной области получена на основе формализма уравнений Лагранжа 2-го рода и имеет вид:

$$(m_1 + L_1 + L_2)\ddot{y}_1 + y_1(k_1 + k_2) - \ddot{y}_2L_2 - k_2y_2 = L_1\ddot{z}_1 + k_1z_1 + Q_1, \quad (3)$$

$$(m_2+L_2+L_3)\ddot{y}_2+y_2(k_2+k_3)-\ddot{y}_1L_2-k_2y_1=L_3\ddot{z}_2+k_3z_2+Q_2\,. \tag{4}$$

После преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях [11] система уравнений (3)–(4) может быть представлена структурной математической моделью в виде схемы, эквивалентной в динамическом отношении системе автоматического управления [12, 13], продемонстрированной на рис. 2.

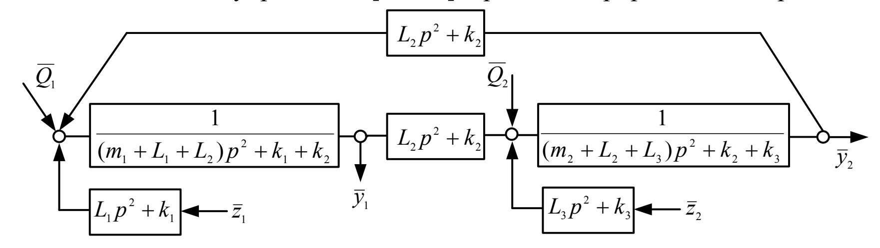


Рис. 2. Структурная математическая модель механической системы, приведенной на рис. 1

II. Построение математических моделей. Вид передаточных функций зависит от природы внешних возмущений, то есть от того, будут ли возмущения силовыми ($\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$) или кинематическими ($\bar{z}_1$ и $\bar{z}_2$). В дальнейшем полагаем, что силовые внешние воздействия $\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$ имеют связность, определяемую соотношением

$$\bar{Q}_2=\alpha\cdot\bar{Q}_1\,, \tag{5}$$

где α — коэффициент связности внешних синфазных гармонических воздействий.

Для кинематических воздействий $\bar{z}_1$ и $\bar{z}_2$ принимается, что

$$\bar{z}_2=\beta\cdot\bar{z}_1\,, \tag{6}$$

где β — коэффициент связности кинематических возмущений.

Коэффициенты связности α и β могут иметь положительные, отрицательные и нулевые значения. Обнуляя α и β соответствующим образом, можно рассмотреть частные случаи действия внешних возмущений.

1. Рассматривается случай совместного силового возмущения при $\beta\neq 0$ ($\bar{Q}_1=0$ и $\bar{Q}_2=0$). Передаточные функции системы в этом случае принимают вид:

$$\underset{\bar{Q}_1=\bar{Q}_2=0}{W_1(p)}=\frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1}=\frac{(L_1p^2+k_1)[(m_2+L_2+L_3)p^2+k_2+k_3]+\beta(L_3p^2+k_3)(L_2p^2+k_2)}{A(p)}\,, \tag{7}$$

$$\underset{\bar{Q}_1=\bar{Q}_2=0}{W_2(p)}=\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1}=\frac{\beta(L_3p^2+k_3)[(m_1+L_1+L_2)p^2+k_1+k_2]+(L_1p^2+k_1)(L_2p^2+k_2)}{A(p)}\,, \tag{8}$$

где

$$A(p)=[(m_1+L_1+L_2)p^2+k_1+k_2]\cdot[(m_2+L_2+L_3)p^2+k_2+k_3]-(L_2p^2+k_2)^2 \tag{9}$$

— частотное характеристическое уравнение системы.

При рассмотрении передаточных функций (7), (8) принимается, что режим динамического гашения колебаний определяется условиями обнуления числителей (7), (8). По координате $\bar{y}_1$ возможно появление двух частот динамического гашения колебаний. По координате $\bar{y}_2$ также возможна реализация двух режимов динамического гашения колебаний в силу возможного существования корней биквадратного частотного уравнения.

Полагая, что изменяемым фактором является β (коэффициент связности), можно построить частотную диаграмму, имея в виду следующие частоты:

1. парциальные частоты:

$$n_1^2=\frac{k_1+k_2}{m_1+L_1+L_2}\,, \tag{10}$$

$$n_2^2=\frac{k_2+k_3}{m_2+L_2+L_3}\,; \tag{11}$$

2. критическая частота межпарциальной связи:

$$n_{\text{пар}}^2=\frac{k_2}{L_2}\,; \tag{12}$$

3. частоты динамического гашения колебаний, определяющиеся из решения уравнений по координате $\bar{y}_1$:

$$p^4[L_1(m_2+L_2+L_3)+\beta L_2L_3]+p^2[L_1(k_2+k_3)+k_1(m_2+L_2+L_3)+\beta(k_3L_2+k_2L_3)]+ \\ +k_1(k_2+k_3)+\beta k_2k_3=0; \tag{13}$$

и по координате $\bar{y}_2$:

$$p^4[\beta L_3(m_1+L_1+L_2)+L_1L_2]+p^2[\beta L_3(k_1+k_2)+\beta k_3(m_1+L_1+L_2)+k_1L_2+k_2L_1]+ \\ +\beta k_3(k_1+k_2)+k_1k_2=0. \tag{14}$$

Для построения частотной диаграммы принимаются следующие параметры модельной задачи: m_1 = 10 кг; m_2 = 10 кг; k_1 = 5000 Н/м; k_2 = 10000 Н/м; k_3 = 15000 Н/м; L_1 = 5 кг; L_2 = 10 кг; L_3 = 10 кг.

Режимы динамического гашения колебаний по координатам $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ определяются не только параметрами упруго-инерционных элементов, но и спецификой формирования внешних воздействий, в частности, влияние может быть оказано величиной коэффициента связности.

Из уравнений (13), (14) могут быть найдены соответствующие частоты динамического гашения колебаний, отображающие тот факт, что по каждой из координат $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ может быть найдено по две частоты динамического гашения колебаний. Величины частот, как это следует из (13)–(14), зависят от значения коэффициента связности кинематических возмущений β. На рис. 3 приведена частотная диаграмма системы.

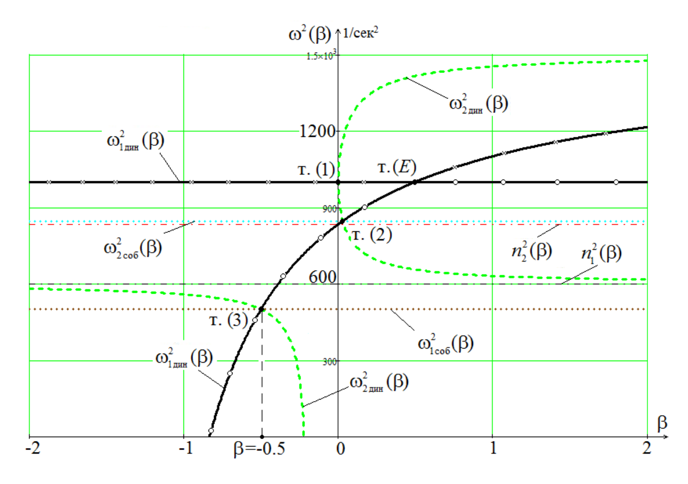


Рис. 3. Частотная диаграмма системы, изображенной на рис. 1

На диаграмме сплошная линия (——) соответствует графику зависимости $\omega^2_{1\,\text{дин}}(\beta)$. Поскольку частотные уравнения (13)–(14) являются биквадратными, то каждое из уравнений имеет по два корня. Это отображается двумя графиками. Для графика зависимости $\omega^2_{1\,\text{дин}}(\beta)$ сплошная линия помечена специальными значками (×××), а для второго корня — соответственно (∘∘∘∘); графики зависимостей $\omega^2_{1\,\text{дин}}(\beta)$ соприкасаются в т. (E).

В свою очередь, графики зависимостей $\omega^2_{2\,\text{дин}}(\beta)$ представлены штриховыми линиями (— — —). График зависимости $\omega^2_{2\,\text{дин}}(\beta)$ состоит из двух не соприкасающихся блоков. Взаимные пересечения графиков зависимостей $\omega^2_{1\,\text{дин}}(\beta)$ и $\omega^2_{2\,\text{дин}}(\beta)$ происходят в тт. (1), (2), (3). Каждая из рассматриваемых точек определяет особенности амплитудно-частотных характеристик, связанных с проявлениями особенностей режимов динамического гашения колебаний.

В обычной постановке исследования задач динамического гашения колебаний, то есть при действии одиночного возмущающего фактора, соотнесенного с определенной координатой, в системе с двумя степенями свободы определяется одна частота динамического гашения колебаний. Такая частота определяется значениями парциальной частоты того блока системы, движение которого демонстрирует динамическое гашение колебаний (то есть «обнуление» значения соответствующей координаты).

При действии нескольких одновременных возмущений становится возможным реализация, в целом для системы, двух режимов динамического гашения колебаний по каждой из координат. При введении в систему дополнительных связей, в частности, на основе устройств для преобразования движения (УПД), проявляются специфические свойства, когда становится возможным динамическое гашение колебаний одновременно по двум координатам.

III. Сравнительный анализ динамических свойств систем в режимах динамического гашения колебаний.

1. На рис. 4 приводятся амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы, которые проявляются в условиях, соответствующих пересечению графиков $\omega^2_{1\,дин}(\beta)$ и $\omega^2_{2\,дин}(\beta)$ в т. (1) на рис. 3. Пересечение соответствует ситуации, когда β = 0. Сплошная линия (——) на рис. 4 соответствует графику зависимости $\frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1}(\omega)$; точечная линия (·······) соответствует графику $\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1}(\omega)$. Параметры системы, в целом, приведены также на рис. 4.

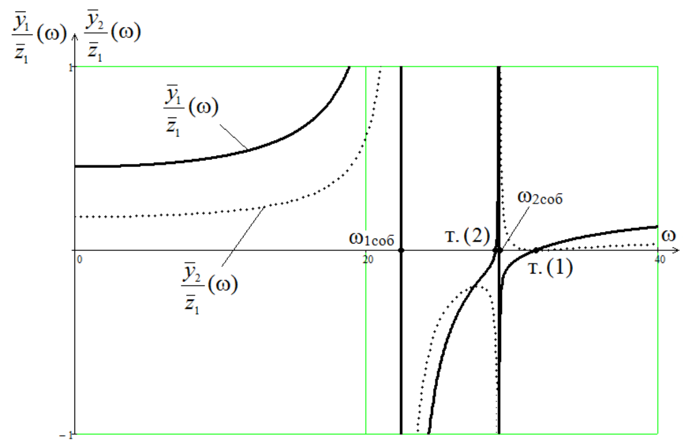


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики системы для параметров, определяемых т. (1) на рис. 3

В т. (1) на рис. 4 определяется частота режима динамического гашения колебаний, когда значение координат $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ одновременно «обнуляется».

По координате $\bar{y}_1$, соответствующей графику $\frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1}(\omega)$ в т. (2) (рис. 4), возможна реализация еще одного режима динамического гашения колебаний. При этом амплитудно-частотные характеристики отражают свойства систем с двумя степенями свободы. По координате $\bar{y}_1$, как это следует из АЧХ, возможна реализация двух режимов динамического гашения колебаний в тт. (1) и (2). Для АЧХ, соответствующей координате $\bar{y}_2$, также возможна ситуация создания двух режимов динамического гашения колебаний при двойном пересечении графика $\frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1}(\omega)$ линией абсцисс после частоты собственных колебаний $\omega^2_{2\,соб}$. Таким образом, при невырожденной АЧХ по каждой из координат $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ могут быть реализованы по два режима динамического гашения колебаний; при этом на одной из частот происходит одновременное динамическое гашение колебаний по двум координатам.

2. На рис. 5 приведены АЧХ системы при $\beta = -\frac{1}{2}$, из которых следует, что при определенных соотношениях параметров становится возможной структурная перестройка системы, когда одна степень свободы деградирует. В этом случае по каждой из координат $\bar{y}_1$ и $\bar{y}_2$ (точки (1) и (2) на рис. 5) возможна реализация режимов динамического гашения колебаний, но это происходит при «деградации» системы; при условиях, когда $\omega \to \infty$ АЧХ приобретают предельные свойства.

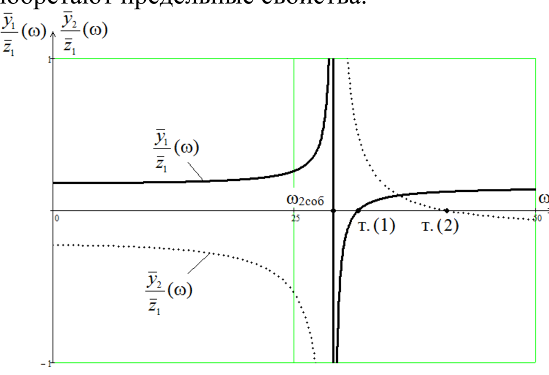


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики системы при $\beta = -\frac{1}{2}$, соответствующие т. (3) на рис. 3

3. На рис. 6 приведены АЧХ системы при $\beta = \frac{1}{34}$, что соответствует т. (2) на рис. 3. Для данного состояния системы, определяемого значениями ее параметров, также характерно структурное преобразование системы, которая «деградирует» до статуса системы с одной степенью свободы. В целом для системы по каждой из координат возможна реализация режимов динамического гашения колебаний, что соответствует т. (1) и т. (2) на графиках, приведенных на рис. 6.

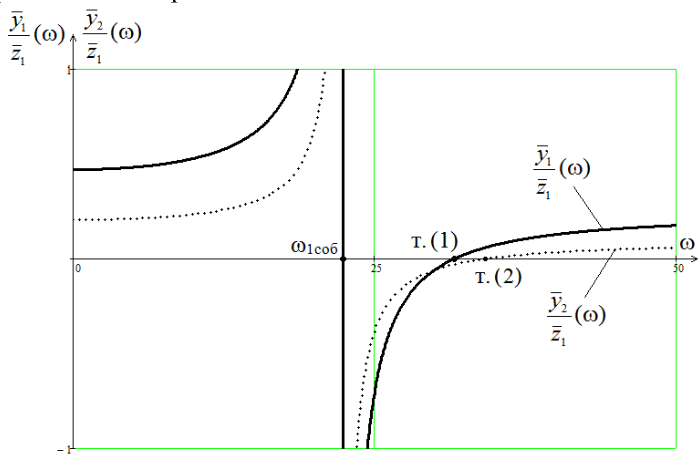


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики системы при $\beta = \frac{1}{34}$, соответствующие т. (2) на рис. 3

В области высоких частот ($\omega \to \infty$) система приобретает предельные свойства; при этом, по сравнению с предыдущем примером, когда $\beta = -\frac{1}{2}$, при $\beta = \frac{1}{34}$ отношения амплитуд колебаний будет иметь другой знак. Следовательно, изменения параметров системы при одновременном действии двух сил могут существенным образом изменять динамические свойства механических колебательных систем.

Заключение. Одновременное действие внешних возмущений при наличии в системе дополнительных связей, реализуемых УПД при кинематическом возмущении, может оказывать существенное влияние на изменение динамических свойств механических колебательных систем с несколькими степенями свободы. Итак, авторами в настоящей работе получены следующие научные результаты:

1. предложен метод построения математических моделей на основе использования методов структурного математического моделирования, в рамках которого механической колебательной системе сопоставляется эквивалентная в динамическом отношении система автоматического управления;

2. предложена методика построения частотных диаграмм, обеспечивающих возможности интегральной оценки взаимозависимости частотных характеристик при изменениях параметров системы и условий их возмущения при различных силовых факторах;

3. получены аналитические условия возможности реализации режимов динамического гашения колебаний одновременно по двум координатам при действии двух возмущающих факторов, связанных между собой;

4. предложены возможности управления структурными состояниями, когда исходная механическая колебательная система может изменять число степеней свободы и систему своих динамических свойств.

Библиографический список

1. Елисеев, С. В. Динамические гасители колебаний / С. В. Елисеев, Г. П. Нерубенко. — Новосибирск : Наука, 1982. — 142 с.

2. Коренев, Б. Г. Динамические гасители колебаний : теория и технические приложения / Б. Г. Коренев, Л. М. Резников. — Москва : Наука, 1988. — 304 с.

3. Елисеев, С. В. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко. — Новосибирск : Наука, 2014. — 357 с.

4. Карамышкин, В. В. Динамическое гашение колебаний / В. В. Карамышкин. — Ленинград : Машиностроение, 1988. — 108 с.

5. Вибрации в технике / под ред. В. Н. Челомей. — Москва : Машиностроение, 1981. — 456 с.

6. Harris C.M. Shock and Vibration Handbook / C. M. Harris, A. G. Piersol. — New York: McGraw — Hill Book Co, 2002. — 1457 p.

7. Елисеев, С. В. Математические модели механических систем с г-образными динамическими гасителями / С. В. Елисеев, С. В. Белокобыльский // Математика, ее приложения и математическое образование : материалы IV междунар. конф. — Улан-Удэ, 2011. — С. 150–155.

8. Елисеев, С. В. Т-образные рычажные механизмы в теории транспортной вибрационной защиты / С. В. Елисеев, А. И. Артюнин, Е. В. Каимов // Кулагинские чтения : материалы XIV междунар. науч.-практ. конф. — Чита, 2014. — С. 298–305.

9. Елисеев, С. В. Некоторые возможности динамического гашения колебаний в системах с несколькими степенями свободы / С. В. Елисеев, В. Б. Кашуба, А. В. Николаев, К. Ч. Выонг // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. – 2017. — № 1 (54). — С. 290–301.

10. Ильинский, В. С. Защита аппаратов от динамических воздействий / В. С. Ильинский. — Москва : Энергия, 1970. — 320 с.

11. Елисеев, С. В. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем / С. В. Елисеев, А. И. Артюнин. — Новосибирск : Наука, 2016. — 459 с.

12. Елисеев, С. В. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко, А. А. Засядко. — Иркутск : изд-во ИГУ, 2008. — 523 с.

13. Елисеев, С. В. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко. — Новосибирск : Наука, 2011. — 384 с.

Поступила в редакцию 01.11.2018
Сдана в редакцию 01.11.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 01.11.2018
Submitted 01.11.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторах:

Елисеев Сергей Викторович,
Директор-главный научный сотрудник НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения (РФ, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6876-8786
eliseev_s@inbox.ru

Миронов Артем Сергеевич,
Соискатель НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования Иркутского государственного университета путей сообщения (РФ, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15),
ORCID : https://orcid.org/0000-0002-0921-0915
art.s.mironov@mail.ru

Выонг Куанг Чык,
аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения (РФ, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3026-5301
trucvq1990@gmail.com

Authors:

Eliseev, Sergey V.,
Director - Chief Research Scholar, REC of High Technologies, System Analysis and Modeling, Irkutsk State Railway Transport Engineering University (15, ul. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6876-8786
eliseev_s@inbox.ru

Mironov, Artem S.,
EdD Candidate, REC of High Technologies, System Analysis and Modeling, Irkutsk State Railway Transport Engineering University (15, ul. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, RF),
ORCID : https://orcid.org/0000-0002-0921-0915
art.s.mironov@mail.ru

Quang Truc Vuong,
postgraduate student, REC of High Technologies, System Analysis and Modeling, Irkutsk State Railway Transport Engineering University (15, ul. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3026-5301
trucvq1990@gmail.com

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 45–55. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 1, pp. 45–55. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55

Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения*

Ю. Г. Кабалдин[1], Д. А. Шатагин[2], М. С. Аносов[3], А. М. Кузьмишина[4]**
[1, 2, 3, 4] Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Development of digital twin of CNC unit based on machine learning methods ***

Yu. G. Kabaldin[1], D. A. Shatagin[2], M. S. Anosov[3], A. M. Kuzmishina[4]**
[1, 2, 3, 4] Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Введение. В статье показано, что цифровой двойник (электронный паспорт) станка с ЧПУ разрабатывается как киберфизическая система.
Цель работы — создание нейросетевых моделей, определяющих функционирование станка с ЧПУ, его производительность и динамическую устойчивость при резании.
Материалы и методы. Рассматриваются вопросы создания математических моделей процессов механической обработки с использованием системы сенсоров и промышленного интернета вещей. Оценены методы машинного обучения, подходящие для реализации названных задач. Предложена нейросетевая модель динамической устойчивости процесса резания, позволяющая оптимизировать процесс механической обработки на этапе технологической подготовки производства. На основе подходов нелинейной динамики реконструированы аттракторы динамической системы резания и определены их фрактальные размерности. Выбраны оптимальные характеристики оборудования по входным параметрам и отладке планируемого технологического процесса на основе цифровых двойников.
Результаты исследований. Использование методов машинного обучения позволило создать и исследовать нейросетевые модели технологических систем обработки резанием и программное обеспечение для их реализации. Показана возможность применения деревьев решений для задачи диагностики и классификации неисправностей станков с ЧПУ.
Обсуждение и заключения. В реальном производстве технология цифровых двойников позволяет оптимизировать режимы обработки с учетом технического и динамического состояния станков с ЧПУ. Это обеспечивает высокоточную оценку производственных мощностей предприятия при составлении производственной программы. Кроме того, на основе интеллектуального анализа данных системы распределенных сенсоров можно выявить неисправности оборудования в режиме реального времени.

Introduction. It is shown that the digital twin (electronic passport) of a CNC machine is developed as a cyber-physical system. The work objective is to create neural network models to determine the operation of a CNC machine, its performance and dynamic stability under cutting.
Materials and Methods. The development of mathematical models of machining processes using a sensor system and the Industrial Internet of Things is considered. Machine learning methods valid for the implementation of the above tasks are evaluated. A neural network model of dynamic stability of the cutting process is proposed, which enables to optimize the machining process at the stage of work preparation. On the basis of nonlinear dynamics approaches, the attractors of the dynamic cutting system are reconstructed, and their fractal dimensions are determined. Optimal characteristics of the equipment are selected by input parameters and debugging of the planned process based on digital twins.
Research Results. Using machine learning methods allowed us to create and explore neural network models of technological systems for cutting, and the software for their implementation. The possibility of applying decision trees for the problem of diagnosing and classifying malfunctions of CNC machines is shown.
Discussion and Conclusions. In real production, the technology of digital twins enables to optimize processing conditions considering the technical and dynamic state of CNC machines. This provides a highly accurate assessment of the production capacity of the enterprise under the development of the production program. In addition, equipment failures can be identified in real time on the basis of the intelligent analysis of the distributed sensor system data.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: Uru.40@mail.ru, dmitsanych@gmail.com, ansv-maksim@rambler.ru, Foxi-16@mail.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.

Ключевые слова: киберфизическая система, нейросетевая модель, большие данные, интернет вещей, цифровой двойник.

Keywords: cyber-physical system, neural network model, big data, Internet of Things, digital twin.

Образец для цитирования: Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения / Ю. Г. Кабалдин [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 45–55. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55

For citation: Yu.G. Kabaldin, et al. Development of digital twin of CNC unit based on machine learning methods. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 45–55 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55

Введение. Предложенная в [1] единая базовая управляющая платформа служит основой при разработке нового поколения систем управления технологическим оборудованием, а также позволяет совершенствовать системы числового программного управления (ЧПУ) для цифровых производств. Такой платформой могут быть открытые системы ЧПУ станков с большими вычислительными ресурсами и высоким быстродействием обработки крупной базы данных (БД), встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с промышленным интернетом. В последнем случае речь идет о возможностях использования облачных технологий обработки больших объемов данных на серверах предприятий (локальные сети) и провайдеров. Все это создаст основу интеллектуального управления для широкой номенклатуры технологического оборудования с ЧПУ.

С девяностых годов XX века [2] авторы представленного исследования разрабатывают программные продукты для интеллектуального управления технологическим оборудованием. В частности, были предложены критерии оценки динамической устойчивости процесса резания, основанные на методах нелинейной динамики и фрактального анализа сигналов виброакустической эмиссии (ВАЭ). Авторы создали единую платформу расширения функциональных возможностей различного технологического оборудования с системами ЧПУ. Она реализуется путем встраивания в системы ЧПУ модулей высокопроизводительных вычислений и глубокого обучения искусственных нейронных сетей с использованием технологий CUDA nVidia. В рамках данной работы изучается технологическое оборудование с ЧПУ, оснащенное датчиками и задействующее облачные технологии для сбора и обработки информации по разработанным методикам. Такие системы будут рассматриваться как киберфизические [3].

Предполагается, что разработанная авторами платформа станет основой цифровизации на всех уровнях предприятия. Для этого она должна не только анализировать данные оборудования, систем, устройств, но и использовать полученную таким образом информацию, чтобы сократить время вывода новых изделий на рынок, повысить гибкость производства, качество продукции и эффективность производственных процессов.

Цифровой двойник (digital twin) — новое слово в моделировании оборудования, техпроцессов и планировании производств [3]. Это совокупность математических моделей, достоверно описывающих процессы и взаимосвязи на отдельном объекте и в рамках целого производственного предприятия с использованием анализа больших данных (big data) и машинного обучения.

Лидер в области использования цифровых двойников — компания Siemens [3]. Согласно ее определению, цифровой двойник — это ансамбль математических моделей. Они характеризуют различные состояния оборудования, технологических и бизнес-процессов во времени, в соответствии с текущими производственными условиями. Среди таких математических моделей особое место занимают нейросетевые схемы, т. е. нейросетевая модель процесса или изделия — это его цифровой двойник [2].

Основной технологической единицей цифрового производства является киберфизическая система (КФС) [1]. Ее высокие адаптивные и интеллектуальные возможности обусловлены следующими особенностями:
— ассоциативное восприятие информации,
— постоянное обучение,
— оценка текущего и прогнозирование будущего состояния.

КФС способна анализировать многомерные данные, учитывая даже скрытые факторы реального производства. Основываясь на этих данных, она может автономно решать задачи оптимизации и принимать правильные решения. Поэтому КФС — главный элемент при создании цифрового двойника. Под цифровым двойником в данном случае подразумевается:
— комплекс математических моделей, характеризующих различные состояния оборудования, технологических процессов во времени, в соответствии с текущими производственными условиями;

— детализированные сборочные 3D-модели объектов, отражающие связи и взаимодействия между узлами.

С этой точки зрения цифровой двойник можно рассматривать как цифровую идентичность КФС, электронный паспорт, в котором фиксируются все данные об обрабатываемых материалах, выполненных технологических операциях и испытаниях.

В настоящее время цифровые двойники в основном создаются для коммерческого использования. Они успешно работают в нефтяной и газовой промышленности. При этом в литературе нет данных о двойниках оборудования механообрабатывающих производств на базе КФС.

Цифровые двойники на базе КФС можно получить, используя:
— традиционные аналитические подходы, основанные на математическом описании физических процессов;
— современные статистические методы, в том числе машинное обучение.

Материалы и методы. Методы машинного обучения, применяемые для построения статистических моделей, можно разбить на три группы: модели регрессионного анализа, модели классификации и модели выявления аномалий [4–6] (табл. 1).

Таблица 1

Основные методы машинного обучения

Регрессионный анализ	Классификация	Выявление аномалий
Линейная регрессия	Логистическая регрессия	Метод опорных векторов
Байесовская регрессия	Лес деревьев решений	Анализ главных компонент
Лес деревьев решений	Джунгли решений	K-средние
Деревья решений	Деревья решений	Нейронные сети
Квантильная регрессия быстрого леса	Метод опорных векторов	Самоорганизующиеся карты Кохонена
Нейронные сети	Точечная машина Байеса	
Регрессия Пуассона	One-vs-All	
Порядковая регрессия	Нейронные сети	

Выбор метода машинного обучения зависит от размера, качества и природы данных, а также от типа решаемых задач. Существующие методы требуют различных вычислительных мощностей и обладают различной степенью точности. Как правило, их оценивают по возможности достичь точной аппроксимации данных и выявить границы в пространстве данных. Метод искусственных нейронных сетей (ИНС) является наиболее универсальным и точным, он позволяет работать с большим количеством данных и строить нелинейные зависимости. Нейронные сети задействуют большое количество параметров настройки, что открывает возможности для создания высокоточных моделей процессов, работающих в режимах регрессионного анализа, классификации и выявления аномалий.

Основной метод анализа качества моделей — перекрестная проверка. Она позволяет оценить статистическое качество исходных данных за счет построения и сравнения нескольких моделей, полученных на различных обучающих и проверочных выборках. При построении моделей сложных объектов и систем требуется снижение размерности данных и устранение эффекта мультиколлинеарности переменных. Решение таких задач возможно за счет применения метода главных компонент, позволяющего представить многомерные данные в виде ограниченного числа составляющих (компонент). Такой обобщающий подход может применяться и для устранения переобучения моделей. Основные методы машинного обучения представлены в табл. 1.

Для повышения качества модели используют бэггинг и бустинг. Суть данных алгоритмов заключается в построении не одной модели, а их комплекса, работающего над той же задачей. Результатом такой работы является некая интегральная оценка вероятности какого-либо события. Данная оценка может быть представлена как синергетический эффект действия группы моделей, каждая из которых по отдельности работает неудовлетворительно. Таким образом, цифровым двойником может быть комплекс статистических моделей, исполь-

зующих различные комбинации методов машинного обучения и прошедших различные стадии верификации и улучшения.

Итак, в общем случае цифровой двойник на базе КФС — это многофакторная модель оборудования [1], включающая ансамбль электронных (т. е. нейронносетевых) моделей. В данном случае определяющими будут следующие нейронные сети: динамической устойчивости процесса резания, сил резания и шероховатости обработанной поверхности. Силы резания вызывают упругие отжатия в системе «инструмент — деталь», что обусловливает погрешности формы и размеров.

Для решения данной задачи был разработан комплекс статистических моделей, использующих методы машинного обучения. Полученные модели являются основой для цифрового двойника токарного станка с ЧПУ. Они позволяют решать задачи регрессионного анализа для прогнозирования динамики процесса резания при различных условиях обработки, шероховатости обработанной поверхности и сил резания. Кроме того, с помощью этих моделей решаются задачи классификации для оценки текущего состояния станка. Схема процесса создания цифрового двойника представлен на рис. 1.

Рис. 1. Схема процесса создания цифрового двойника станка с ЧПУ

Рассмотрим более подробно нейросетевую модель динамики процесса резания. Обучающая выборка была получена на основе телеметрических данных, собранных в процессе механической обработки с использованием распределенной системы датчиков сигнала ВАЭ, динамометра и технологии промышленного интернета вещей (industrial internet of things, IIoT). Количество датчиков, их тип и пространственная ориентация определялись в соответствии с компоновкой оборудования. Наличие в системе большого числа датчиков с различной пространственной ориентацией объясняется неоднородностью материалов и конструкций, особенностями распространения сигналов, а также возможностью перестройки колебательной системы в процессе эксплуатации. Таким образом, использование гетерогенной системы сенсоров позволило получить наиболее полную динамическую картину процессов в n-мерном пространстве «состояние — время». В качестве протокола приема-передачи данных в рамках сети IIoT был использован стандартный протокол TCP/IP, а также текстовый формат обмена данными JSON (JavaScript Object Notation).

Для предварительной обработки сигналов применялись аналоговые и цифровые полосовые фильтры, а также вейвлет-фильтры. Использование вейвлет-фильтров позволило:

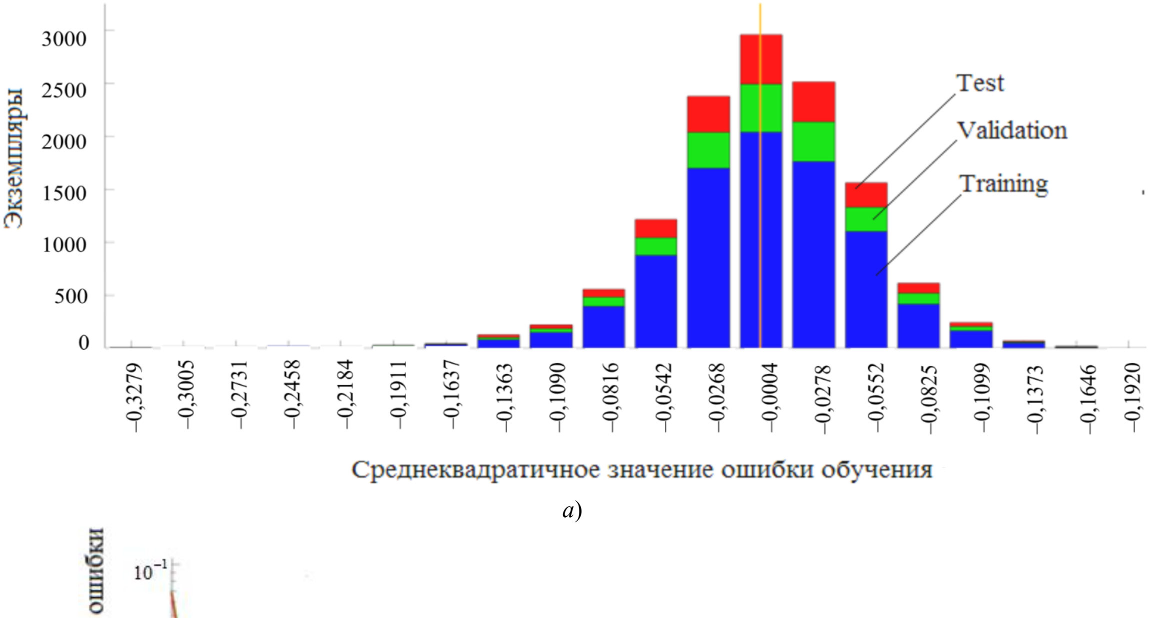
— исключить влияние шумовой составляющей в сигналах ВАЭ;

— выделить периодическую и хаотическую составляющие на основе энтропийных показателей.

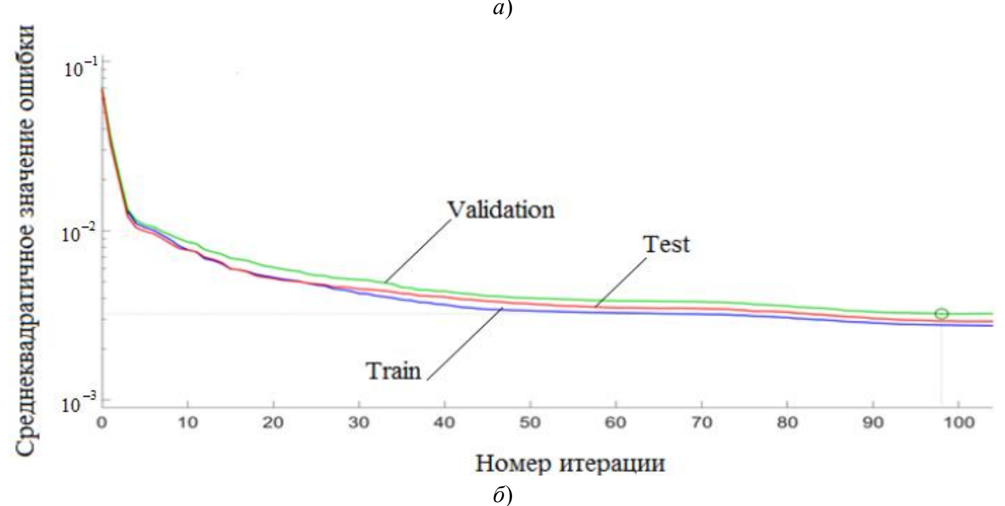
Предварительная обработка данных проводилась на «пограничном» устройстве (Edge), которое вычисляет значения параметров сигнала ВАЭ и формирует пакеты данных для отправки в виртуальное облачное хранилище. Построение математических моделей на основе методов машинного обучения требует структурирования и разметки данных. Однако учитывая особенности технологии работы IIoT, построение реляционных БД не всегда возможно, поэтому был применен подход на основе технологий NoSQL. Для этого хранение и обработка данных были реализованы на виртуальном сервере, имитирующем работу вычислительного кластера. На этом сервере была развернута специальная распределенная, масштабируемая файловая система.

В качестве основы использовались свободно распространяемые утилиты, библиотеки и фреймворки проекта Hadoop (это одна из наиболее успешных и распространенных технологий больших данных). В частности, программная оболочка Hadoop Common управляет распределенной файловой системой HDFS и базой данных HBase [4]. Для выполнения распределенных вычислений и обработки больших объемов данных использовалась система MapReduce, обеспечивающая автоматическое распараллеливание и распределение задач на кластере. Для ускорения обучения нейросетевых моделей были задействованы графические процессоры nVidia CUDA.

Результаты исследования. Для создания статистической модели динамического состояния процесса резания выбрана рекуррентная ИНС с сигмоидальной функцией активации нейронов. В качестве обучающей выборки использованы данные, полученные в процессе работы промышленного оборудования. При обучении использовался алгоритм обратного распространения ошибки. По окончании процесса обучения проводилась верификация полученной модели на основе значений средней квадратичной ошибки. На рис. 2, *а* видно монотонное убывание ошибки. При этом ее распределение является нормальным и сосредоточено вблизи нулевого значения, что свидетельствует о хорошем качестве полученной модели.



а)



б)

Рис. 2. Оценка качества полученной модели: диаграмма распределения ошибки обучения (*а*); зависимость среднеквадратичной ошибки от итерации обучения (*б*)

Полученная ИНС (рис. 3) состоит из 17 входных нейронов, воспринимающих информацию об условиях обработки и предыдущем динамическом состоянии.

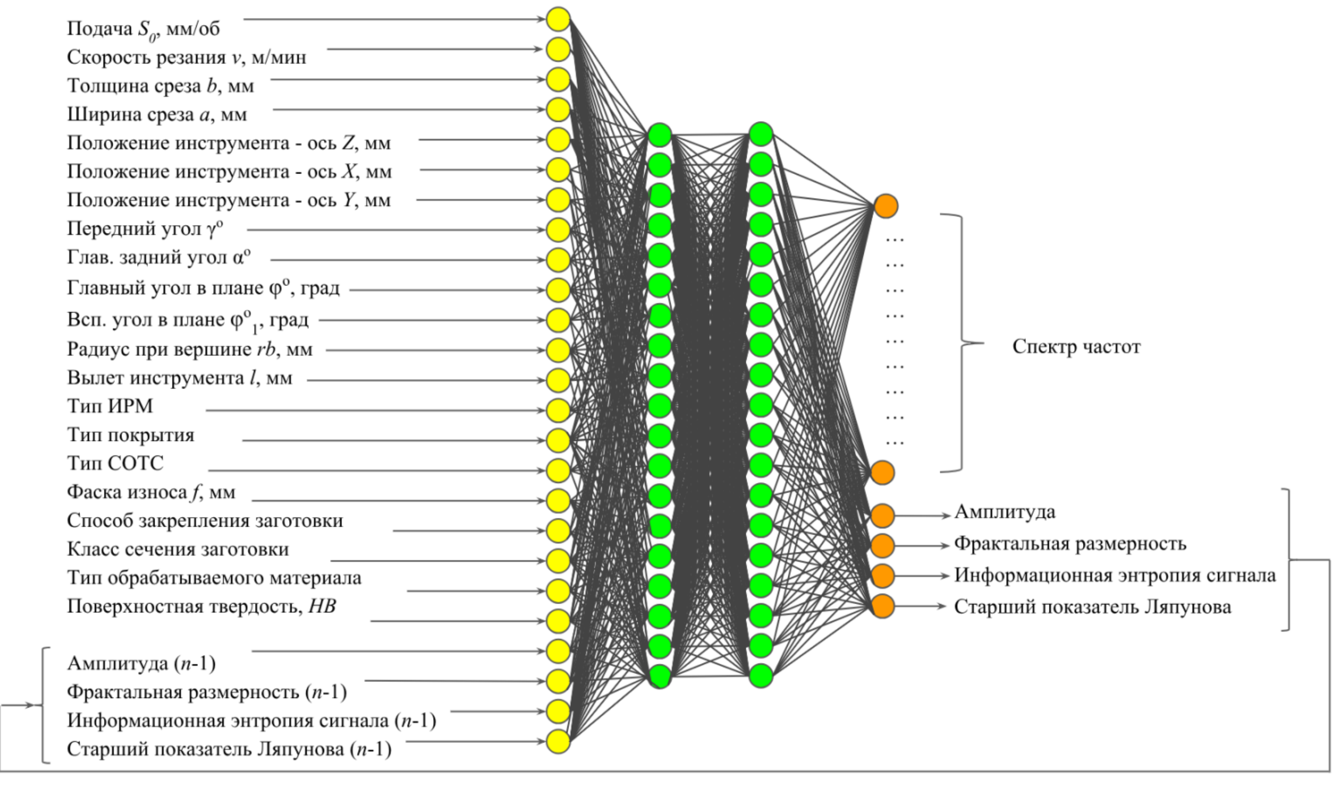
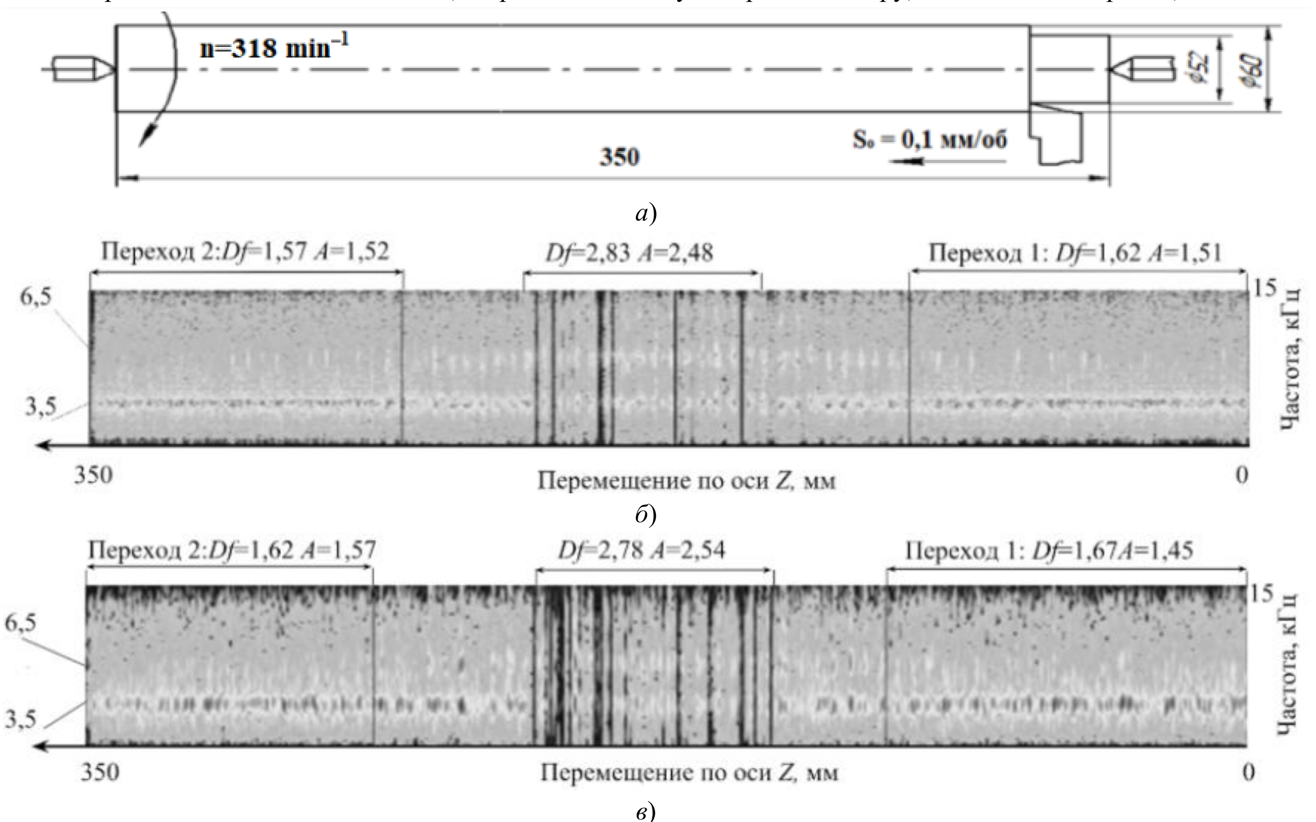
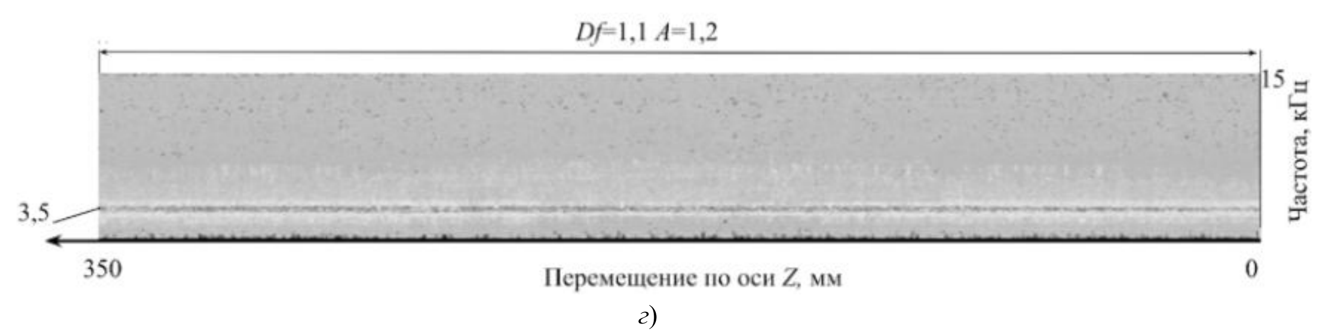


Рис. 3. Нейросетевая модель динамической устойчивости процесса резания

Выходной слой нейронов отражает информацию о динамическом состоянии системы резания. Скрытый слой образован 38 нейронами. Данная ИНС способна моделировать динамику динамической системы резания для различных условий обработки в заданные моменты.

Для оценки адекватности нейросетевой модели было проведено моделирование процесса механической обработки на токарном обрабатывающем центре с ЧПУ. В качестве обрабатываемой заготовки использовался вал из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, закрепленный с двух сторон по центру, как показано на рис. 4, *а*.





г)

Рис. 4. Результаты нейросетевого моделирования: схема обработки (*а*), моделируемый процесс резания (*б*), реальный процесс резания (*в*), процесс резания после оптимизации (*г*)

Режимы определены в соответствии с производственными нормами для обработки деталей данного типа на токарном станке с ЧПУ. Симуляцию перемещения инструмента относительно заготовки обеспечила переменная на входном слое ИНС, отвечающая за положение суппорта станка по оси *Z*. Шаг изменения данной переменной составлял 0,01 мм на расстоянии от 0 до 350 мм. Так было получено динамическое состояние системы резания для 35 тыс. положений инструмента на оси *Z*. Зафиксированные динамические состояния отражены на соответствующей спектрограмме (рис. 4, *б*): заметны две доминирующие частоты автоколебаний (3,5 кГц и 6,5 кГц) и два фазовых перехода.

Для подтверждения результатов моделирования проводился натурный эксперимент с аналогичными условиями обработки и регистрацией сигнала ВАЭ. По полученным экспериментальным данным была также построена спектрограмма процесса механической обработки (рис. 4, *в*). На ней тоже видны две доминирующие частоты в областях 3,5 кГц и 6,5 кГц и два фазовых перехода. В итоге погрешность моделирования на различных участках обработки составила от 3 % до 7 %. Как видно из рис. 4, предложенные производственные нормы не позволяют получить изделие заданного качества. Это может быть причиной брака, а учитывая биения заготовки, и поломки инструмента.

Использование названных выше норм ведет к неадекватной оценке производственных мощностей предприятия и, соответственно, к некачественному формированию производственной программы. Устранение данного недостатка на этапе конструкторско-технологической подготовки чревато дополнительными временны́ми и финансовыми затратами. Поэтому выполняется корректировка режимов, заложенных в нормах производства. Для этого рассчитываются оптимальные значения вектора технологических условий с использованием ИНС и метода градиентного спуска. Целевыми функциями оптимизации были значения амплитуды сигнала ВАЭ, фрактальной размерности и информационной энтропии, которые должны стремиться к минимуму. В качестве параметров оптимизации выбраны скорость обработки и значение фаски на передней поверхности. По завершении процесса оптимизации были получены новые режимы обработки: $V = 90$ м/мин; $S = 0{,}1$ мм/об; $f\gamma = 0{,}2$ мм.

Эти режимы оценивались также по результатам натурного эксперимента с регистрацией и обработкой сигнала ВАЭ. Как видно из рис. 4, *г*, оптимизация условий обработки позволила повысить динамическую устойчивость процесса резания за счет снижения амплитуды автоколебаний в 2 раза и фрактальной размерности $Df = 1{,}1$. Таким образом, повышалось динамическое качество механической обработки без потери производительности.

Аналогичным путем были получены модели для прогнозирования значений шероховатости обработанной поверхности и сил при резании. Силы резания определяют точность обработки, вызывая упругое отжатие детали и инструмента, а, следовательно, и погрешность формы детали. Данные нейросетевые модели представляют собой многослойные искусственные нейронные сети прямого распространения (рис. 5).

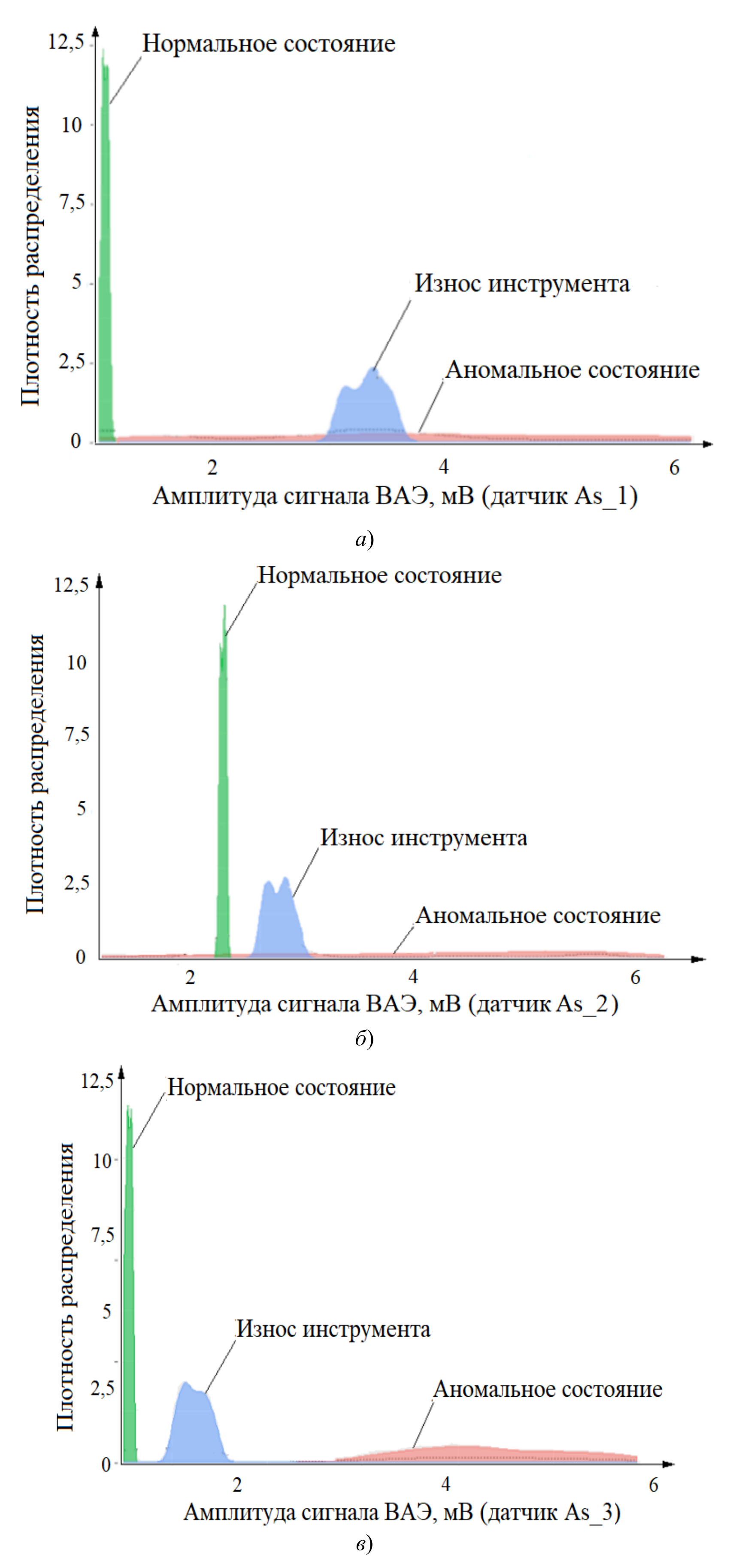


Рис. 5. Распределение значений амплитуды сигнала датчиков: As_1 (*а*), As_2 (*б*), As_3 (*в*)

Нейросетевые модели в составе цифрового двойника применимы не только в реальных производственных условиях, но и при выборе и обосновании закупки оборудования. На этом этапе возможен подбор оптимальных характеристик оборудования и отладка планируемого технологического процесса на цифровых двойниках.

Для оценки текущего состояния оборудования была разработана модель классификации с использованием деревьев решений [5]. В качестве признаков, на основе которых принималось решение, были выбраны значения амплитуды сигнала ВАЭ в различные моменты времени с трех датчиков, расположенных на инструменте (As_1), у передней опоры шпинделя (As_3) и у заднего центра (As_2). В качестве классов использовалось три состояния: нормальное (Normal), износ инструмента (Tool wear) и аномальное (Abnormal). Под аномальным подразумевается любое состояние, при котором качество обработанной поверхности и работа оборудования будут неудовлетворительными. Критерием износа инструмента считалась фаска на задней поверхности h = 0,15 мм. После получения обучающей выборки выполнялся разведочный анализ данных.

Из рис. 5 видно соответствие распределения значений амплитуды сигнала ВАЭ датчика As_1 трем группам состояний. Информация, полученная с этого датчика, хорошо дифференцирует нормальное состояние и износ инструмента. Однако значения, соответствующие аномальному состоянию, имеют пересечения с данными из других групп, поэтому информация с датчика As_1 не может быть использована с высокой точностью для классификации состояний.

Рис. 5, *б* характеризует распределение значений амплитуды сигнала с датчика As_2. Полученные данные имеют низкую информационную ценность из-за двух недостатков:
— пересечения значений группы аномального состояния с другими классами;
— слабая дифференциация нормального состояния и износа инструмента (об этом свидетельствует их близкое расположение).

На рис. 5, *в* показано распределение значений амплитуды сигнала с датчика As_3. Информация с этого датчика хорошо выделяет значения аномального состояния, при этом отсутствуют пресечения значений всех классов состояний. Таким образом, разведочный анализ данных позволяет сделать заключение о возможности получения статистической модели классификации состояния станка с ЧПУ.

Для обучения модели был использован алгоритм CART [3]. Он делит полученные данные на определенные подмножества на разных уровнях. В качестве критерия разделения используется целевая функция минимизации информационной энтропии. Таким образом, каждый новый уровень имеет более определенное содержание признаков. Совокупность всех полученных уровней представляется в виде иерархической древовидной структуры, состоящей из узлов и ветвей, при этом ветвление следует стандартным логическим правилам.

Из всей выборки признаков выбирается такое значение условия деления для корневого узла, которое лучше минимизирует значения информационной энтропии. Затем от каждого полученного узла строятся ветви и происходит аналогичное деление на новые узлы. Подобное ветвление может продолжаться, пока не будут классифицированы все значения обучающей выборки. В общем случае такое дерево будет представлять сложную ветвистую структуру, идеально классифицирующую текущую выборку. Однако оно может показывать очень низкую точность при работе с новыми данными. Поэтому необходима оптимизация размера дерева. Она может проводиться с использованием перекрестной проверки, на основе которой строится несколько деревьев-претендентов, а в итоге выбирается дерево, показавшее лучший результат. Кроме того, выполняется отсечение ветвей, пока данная процедура не приведет к резкому возрастанию ошибки.

На рис. 6 представлена полученная модель классификации состояния оборудования на основе показаний датчиков ВАЭ с использованием дерева принятия решений.

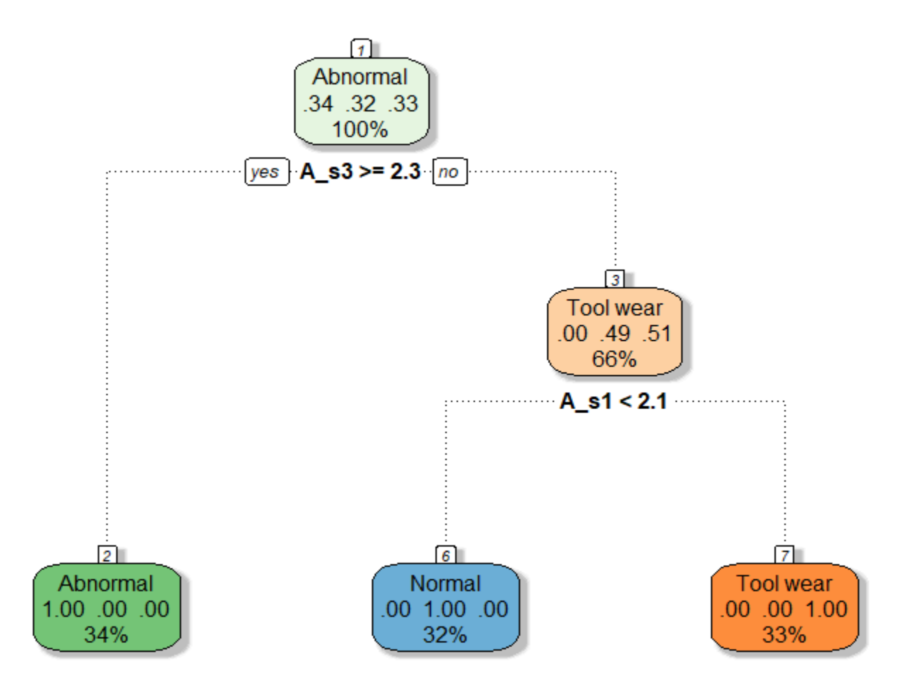


Рис. 6. Дерево решений для классификации состояния оборудования

Первое выбранное условие — показания амплитуды сигнала ВАЭ с датчика As_3. Если амплитуда ВАЭ больше или равна 2,3, то состояние однозначно аномальное. Это суждение подтверждается разведочным анализом данных. В противном случае происходит следующее разбиение, и классификацию определяют данные с датчика As_1. Если амплитуда ВАЭ датчика As_1 меньше 2,1, состояние считается нормальным; если больше, то речь идет об износе инструмента.

Как видно из рис. 6, принятие решений не учитывает показания датчика As_2. Низкая информативность сигнала с этого датчика была выявлена и в ходе разведочного анализа.

Высокая точность определения аномального режима работы на основе анализа сигнала датчика As_3 может быть связана с местом его установки (передняя опора шпинделя). Вероятнее всего, динамические процессы в шпиндельном узле обусловили это состояние, которое отражалось и на качестве механической обработки. Учитывая нелинейные процессы рассеивания колебаний в упругой системе станка, данная информация доходила до других датчиков уже сильно искаженной.

При этом датчик As_1, установленный на инструменте, позволяет выделять его износ с высокой точностью. Это можно объяснить доминирующей ролью резца в общей колебательной системе.

Датчик As_2, установленный на заднем центре, с наименьшей эффективностью регистрирует информацию для классификации состояния. Это можно объяснить удаленностью As_2 от основных динамических процессов.

Таким образом, описанный метод можно применить не только для задачи классификации состояния оборудования, но и для определения оптимального числа датчиков и мест их размещения. Однако стоит учитывать возможность перестройки динамических процессов в системе резания при изменении условий обработки и естественного износа деталей станка.

Обсуждение и заключения. Использование цифровых двойников оборудования при планировании производства позволяет выявить узкие места в технологических операциях, повысить качество продукции, снизить риски поломки инструмента и нештатной работы оборудования. С помощью цифровых двойников можно оптимизировать режимы обработки с учетом технического и динамического состояния каждой производственной единицы. Такой подход обеспечивает высокоточную оценку производственных мощностей предприятия при составлении производственной программы. Кроме того, на основе интеллектуального анализа данных системы распределенных сенсоров в режиме реального времени выявляются неисправности оборудования.

Библиографический список

1. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве / Ю. Г. Кабалдин [и др.]. — Нижний Новгород : Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева, 2018. — 271 с.

2. Организация и управление механообрабатывающим цифровым производством / Ю. Г. Кабалдин [и др.] // Вестник машиностроения. — 2018. — № 11. — С. 19–27.

3. Кабалдин, Ю. Г. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, С. В. Серый. — Комсомольск-на-Амуре : Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2003. — 201 с.

4. Frankel, A. Есть способ лучше: цифровой двойник повысит эффективность процессов конструкторско-технологического проектирования и производства / A. Frankel, J. Larsson // CAD/CAM/CAE Observer. — 2016. — № 3. — С. 36–40.

5. Шитиков, В. К. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R [Электронный ресурс] / В. К. Шитиков, С. Э. Мастицкий. — Режим доступа: http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/DM/DM_R.pdf (дата обращения: 14.02.19).

6. Уайт, Т. Hadoop. Подробное руководство / Т. Уайт. — Санкт-Петербург : Питер, 2013. — 672 с.

Поступила в редакцию 21.01.2019
Сдана в редакцию 22.01.2019
Запланирована в номер 15.02.2019

Received 21.01.2019
Submitted 22.01.2019
Scheduled in the issue 15.02.2019

Об авторах:

Кабалдин Юрий Георгиевич,
профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (РФ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4300-6659
Uru.40@mail.ru

Шатагин Дмитрий Александрович,
старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (РФ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24),
ORCID:http://orcid.org/0000-0003-1293-4487
dmitsanych@gmail.com

Аносов Максим Сергеевич,
старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (РФ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8150-9332
ansv-maksim@rambler.ru

Кузьмишина Анастасия Михайловна,
старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (РФ, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24),
ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6966-3417
Foxi-16@mail.ru

Authors:

Kabaldin, Yury G.,
professor of the Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, (24, ul. Minina, Nizhny Novgorod, 603950, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4300-6659
Uru.40@mail.ru

Shatagin, Dmitry A.,
senior lecturer of the Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, (24, ul. Minina, Nizhny Novgorod, 603950, RF),
ORCID:http://orcid.org/0000-0003-1293-4487,
dmitsanych@gmail.com

Anosov, Maxim S.,
senior lecturer of the Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, (24, ul. Minina, Nizhny Novgorod, 603950, RF),
ORCID:http://orcid.org/0000-0001-8150-9332
ansv-maksim@rambler.ru

Kuzmishina, Anastasia M.,
senior lecturer of the Technology and Equipment of Mechanical Engineering Department, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, (24, ul. Minina, Nizhny Novgorod, 603950, RF),
ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6966-3417,
Foxi-16@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-787 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-56-62

Риск-ориентированный подход в системе «персонал-механизмы-производственная среда» на объектах, эксплуатирующих башенные краны[*]

Е. В. Егельская[1], А. А. Короткий[2], Э. А. Панфилова[3], А. А. Кинжибалов[4]**
[1,2,3,4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Risk-based approach in “personnel-machinery-production environment” system at the facilities running tower cranes[***]

E. V. Yegelskaya[1], A. A. Korotkiy[2], E. A. Panfilova[3], A. A. Kinzhibalov[4]**
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье рассматривается возможность применения риск-ориентированного подхода в системе «персонал-механизмы-производственная среда» на объектах, использующих башенные краны посредством внедрения IT-технологий, обеспечивающих открытое взаимодействие персонала, руководящего состава эксплуатирующих организаций и государственных надзорных органов в целях снижения уровня аварийности.
Материалы и методы. Приведен пример опасного производственного объекта, эксплуатирующего башенные краны. Использованы материалы анализа состояния эксплуатации башенных кранов в условиях действующего законодательства в области промышленной безопасности, выявлена необходимость инноваций и преобразований, одним из составляющих методов которых является риск-ориентированный подход, позволяющий реализовать все необходимые уровни контроля.
Результаты исследования. Определены этапы внедрения риск-ориентированного подхода для машинистов башенного крана, реализованного посредством IT-технологий с использованием Web-приложений по управлению безопасностью при эксплуатации башенного крана на основе анализа опасностей и оценки риска в цветовой гамме, алгоритмически связанной с электронным ключом блокировки его локальной системы безопасности.
Обсуждение и заключения. Применение риск-ориентированного подхода в системе «персонал-механизмы-производственная среда» на объектах, эксплуатирующих башенные краны посредством внедрения IT-технологий, позволит обеспечить надежное функционирование всех подразделений и каждого участника работ по эксплуатации, а также предоставит возможность надзорным органам получать доступ к информации по эксплуатации для осуществления контрольно-надзорных функций дистанционно.

Introduction. The paper discusses the applicability of a risk-based approach in the “personnel-machinery-production environment” system at the facilities running tower cranes through the introduction of IT-technologies that provide open communication of the staff, management team of the operating organizations, and the National Supervisory Authority, to reduce the accident rate.
Materials and Methods. An example of a hazardous production facility running tower cranes is given. Materials on the analysis of operational status of tower cranes within the framework of the current legislation in the field of industrial safety are used. The necessity for innovations and transformations, one of whose methods is the risk-based approach allowing for the implementation of all required levels of control, is identified.
Research Results. The stages of introduction of the risk-oriented approach for tower crane operators implemented through IT-technologies using Web-applications on safety management under the tower crane operation based on the hazard analysis and risk assessment in gamut, algorithmically associated with the electronic block key of its local security system, are determined.
Discussion and Conclusions. The application of a risk-based approach in the “personnel-machinery-production environment” system at the facilities running tower cranes through the introduction of IT-technologies will ensure the proper operation of all departments and each participant of the operation, as well as provide Supervisory bodies with an opportunity to access information on the operation for the implementation of control and supervision functions remotely.



[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: korot@novoch.ru, egelskaya72@mail.ru, korotkaya_elvira@mail.ru , kinzha@gmail.com
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход,государственный надзорный орган, оценка риска, башенные краны, подразделения эксплуатирующего предприятия, машинист крана.

Keywords: risk-based approach, National Supervisory Authority, risk assessment, tower cranes, subdivisions of operating enterprise, crane operator.

Образец для цитирования: Егельская, Е. В. Риск-ориентированный подход в системе «персонал-механизмы-производственная среда» на объектах, эксплуатирующих башенные краны / Е. В. Егельская, А. А. Короткий, Э. А. Панфилова, А. А. Кинжибалов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, №1. — С. 56–62. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-56-62

For citation: E.V. Yegelskaya, et al. Risk-based approach in "personnel-machinery-production environment" system at the facilities running tower cranes. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 56–62. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-56-62

Введение. Первые десятилетия XXI века ознаменованы серьезными достижениями науки и техники, модернизацией и усовершенствованием цифровых технологий, производственных процессов и технических мощностей производственного потенциала России, что служит укреплению экономики государства и повышению уровня жизни граждан.

На фоне перечисленных выше достижений и перспектив особенно остро встают вопросы безопасности осуществления работ и компетентности персонала производственных объектов, а также надзора за безопасной эксплуатацией опасных производственных объектов (ОПО).

Состояние ОПО в целом оценивается такими показателями как аварийность и травмирование. Уровень безопасности опасных производственных объектов находится под контролем государства, где законодательной основой служит Федеральный Закон №116 [1]. С момента его принятия в 1997 году произошел переход от детерминированной к вероятностной оценке риска. Введены новые методы расчета технически сложных и опасных объектов [2], предполагающие проводить их оценку параметрами риска, живучести и безопасности (рис. 1).

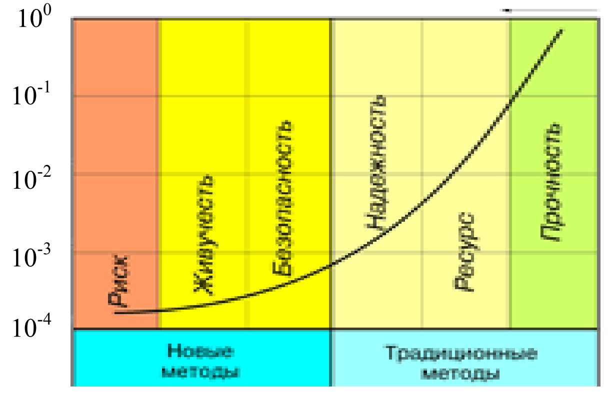


Рис. 1. История развития методов расчета ОПО

Результаты исследования. Рассмотрим ОПО, эксплуатирующий подъемные сооружения, в частности башенные краны. В настоящее время такой объект отнесен к 4 классу опасности (низкой опасности). В связи с этим он освобожден от периодических проверок со стороны федерального органа исполнительной власти в области промышленной безопасности, а ответственность за соблюдение требований промышленной безопасности возлагается в полной мере на владельца или эксплуатирующую организацию. Обсуждение достаточности внутреннего контроля за соблюдением требований промышленной безопасности без участия надзорных органов проводилось на разных уровнях.

Зафиксированный в последние годы всплеск аварийности и травматизма на объектах, эксплуатирующих башенные краны, привел к ужесточению административных мер, а именно:

– при эксплуатации башенных кранов приказом Ростехнадзора №146 от 12.04.2016 внесены изменения в Федеральные нормы и правила по подъемным сооружениям. Статья №141 закрепила участие инспектора Ростехнадзора в комиссии по принятию решения о возможности пуска башенных кранов в работу [3];

– поручение Правительства Российской Федерации № АХ-П9-682 от 8 февраля 2017 г. «Об организации и проведении в период с 2017 по 2019 год внеплановых проверок организаций, эксплуатирующих башенные краны» регулирует порядок внеплановых проверок.

Кроме того, законопроектом предлагается предприятия, на которых используются башенные краны, отнести к 3 классу опасности. Это позволит осуществлять в отношении данных объектов плановые контрольно-надзорные мероприятия с периодичностью один раз в течение трех лет. Сами эксплуатирующие организации также считают эту меру целесообразной.

Критической отметки достигла необходимость преобразований и инноваций в области промышленной безопасности. Важными мероприятиями являются: внедрение риск-ориентированного подхода при организации и осуществлении всех видов государственного контроля (надзора) с 2018 года (введено Федеральным законом № 246-ФЗ от 13.07.2015) [4]; использование информационно-коммуникационных технологий исполнения обязанностей в электронной форме при осуществлении государственного контроля (надзора). Регламентирующий документ — Постановление Правительства РФ №482 от 21.04.2018 «О государственной информационной системе «Типовое облачное решение по автоматизации контрольной (надзорной) деятельности» [5].

Указом Президента РФ «Об Основах государственной политики РФ в области промышленной безопасности на период 2025 года и дальнейшую перспективу» от 06.05.2018 в ряду многих определены такие задачи государственной политики в области промышленной безопасности как: внедрение риск-ориентированного подхода при организации федерального государственного контроля (надзора) в области промышленной безопасности; отмена устаревших, избыточных и дублирующих требований промышленной безопасности [6].

Эксплуатация башенных кранов осуществляется, как правило, на строительных объектах, территориально удаленных от рабочих мест руководителей и специалистов, что предоставляет возможность машинисту крана самостоятельно принимать решение о начале и производстве работ. Периодические посещения объектов специалистами, ответственными за работоспособное состояние, не позволяют объективно оценивать ситуацию, что приводит к многочисленным аварийным ситуациям и травмированиям.

Функции машиниста башенного крана, обозначенные в производственной инструкции, предполагают определенный алгоритм его действий перед началом работ, связанный с определением технической готовности крана к безопасной эксплуатации.

Статистика большинства аварий с башенными кранами и результаты их расследований свидетельствуют о неисправном состоянии кранов (неработоспособном состоянии отдельных узлов), что не находит отражения в вахтенном журнале на этапе осмотра крановщиком. Следствием невыполнения требований инструкции крановщика является отсутствие информации у специалиста, ответственного за работоспособное состояние подъемного сооружения. Руководство организации узнает об произошедших инцидентах как об уже свершившихся фактах — в ходе расследования причин аварий (травмирований).

Многоуровневый контроль и взаимодействие всех участников, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности при эксплуатации башенных кранов (рис. 2) может считаться единственным решением проблем безопасности.



Рис. 2. Алгоритм взаимодействие персонала и руководителей

Применение риск-ориентированного подхода предусматривает методы организации и осуществления всех уровней контроля, в том числе, с целью проведения мероприятий по профилактике нарушений требований безопасности применительно к объектам, эксплуатирующим башенные краны. Данный подход может быть реализован посредством IT-технологии с использованием Web-приложений. Эти приложения помогают управлять безопасностью при эксплуатации технического объекта на основе анализа опасностей и оценки риска в цветовой гамме. Устанавливается алгоритмическая связь с электронным ключом блокировки локальной системы безопасности. Таким образом, с использованием дистанционных технологий обеспечивается соблюдение норм, установленных законодательно в области промышленной безопасности ОПО.

Одним из этапов внедрения риск-ориентированного подхода будет являться внедрение электронных чек-листов по исполнению требований промышленной безопасности через индивидуальные мобильные устройства. При этом информация по исполнению требований безопасности направляется в режиме реального времени по сети Интернет на индивидуальные мобильные устройства руководителю, специалистам и обслуживающему персоналу (рис. 3).



Рис. 3. Электронные чек-листы в виде мобильных приложений

Следующий этап предполагает контроль и подтверждение исполнения требований безопасности, определенных должностной и производственной инструкциями через индивидуальные мобильные устройства, где должны «всплывать» подсказки в виде таблиц о контролируемом действии и сроках его исполнения (рис. 4.)

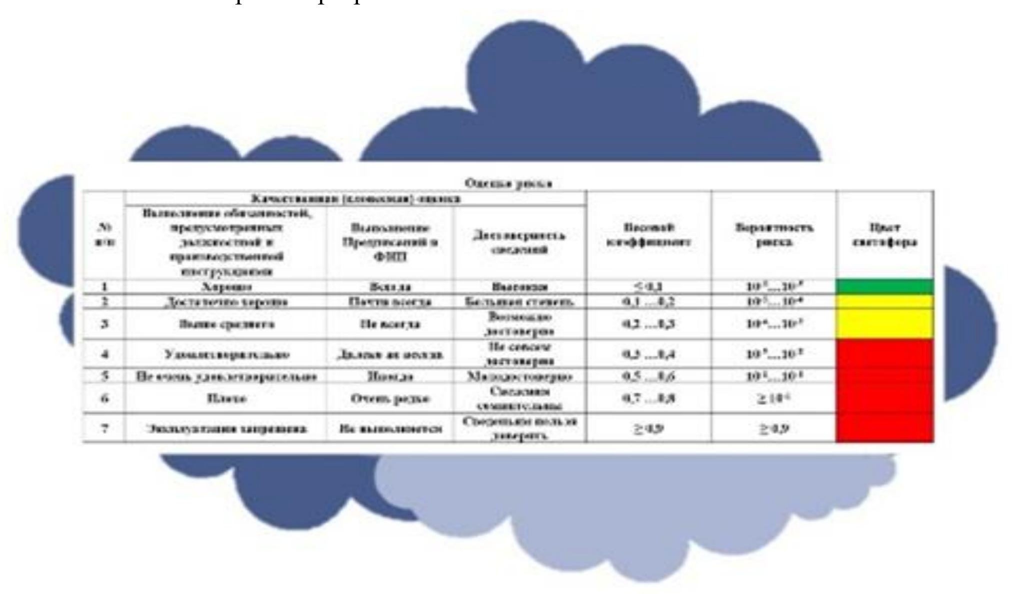


Рис. 4. Экран мобильного устройства с «всплывающими» чек-листами

На последующем этапе предполагается обработка лингвистической информации от руководителей, специалистов и обслуживающего персонала, а также цифровой информации, полученной от координатной защиты крана, в облачном пространстве по алгоритму оценки риска, основанному на теории нечеткого множества Л. А. Заде.

Программное обеспечение по оценке риска при эксплуатации крана отображается в виде цветовой гаммы, например, из трех цветов по схеме:

– красный — «работа запрещена»;
– жёлтый — «работа разрешена, необходимы действия»;
– зеленый — «работа разрешена».



Оценка риска

№ п/п	Качественная (словесная) оценка			Весовой коэффициент	Вероятность риска	Цвет светофора
	Выполнение обязанностей, предусмотренных должностной и производственной инструкциями	Выполнение Предписаний и ФНП	Достоверность сведений			
1	Хорошо	Всегда	Высокая	≤0,1	[illegible]	
2	Достаточно хорошо	Почти всегда	Большая степень	0,1 …0,2	[illegible]	
3	Выше среднего	Не всегда	Возможно достоверно	0,2 …0,3	[illegible]	
4	Удовлетворительно	Далеко не всегда	Не совсем достоверно	0,3 …0,4	[illegible]	
5	Не очень удовлетворительно	Иногда	Малодостоверно	0,5 …0,6	[illegible]	
6	Плохо	Очень редко	Сведения сомнительны	0,7 …0,8	[illegible]	
7	Эксплуатация запрещена	Не выполняется	Сведениям нельзя доверять	≥0,9	≥0,9	

Рис. 5. Оценки риска при эксплуатации крана в цветовой гамме

Особо следует отметить, что доступ к сведениям об имеющихся нарушениях может осуществляться по соответствующему логину и паролю, являющимися конфиденциальной информацией. Это позволит установить причины произошедшего неблагоприятного случая (аварии, инцидента), а также конкретного работника, невыполнившего свои должностные или производственные инструкции (рис. 6).



Рис. 6. Этапы отображения алгоритма риск-ориентированного подхода на мобильных устройствах

Одним из этапов реализации риск-ориентированного подхода является контроль за эксплуатацией крана по сигналу видеонаблюдения посредством дистанционно управляемой камеры видеонаблюдения —

устройство фиксации характеристик «черный ящик». Сигнал от нее передается по сети Интернет в облачное пространство, где хранится видеоинформация (рис. 7).

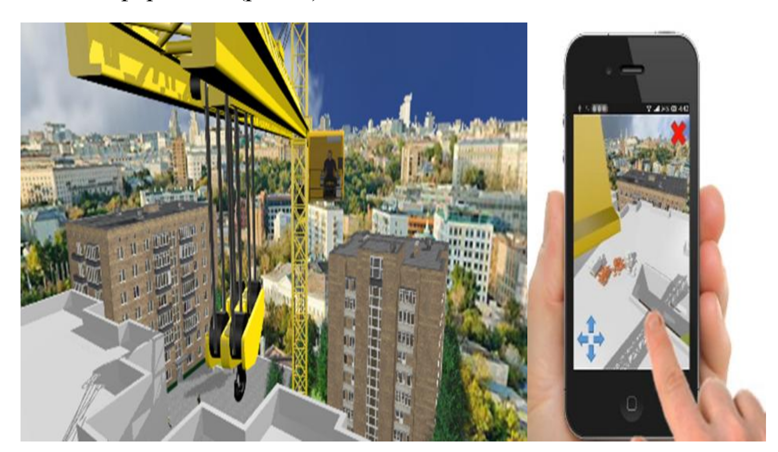


Рис. 7. Отображение панорамы объекта на мобильном устройстве с использованием видеонаблюдения

Заключение. Применение риск-ориентированного подхода в системе «персонал-механизмы-производственная среда» на объектах, эксплуатирующих башенные краны, посредством внедрения IT-технологий позволит обеспечить надежное функционирование всех подразделений и каждого участника работ по эксплуатации. Это предоставит возможность надзорным органам дистанционно получать доступ к информации по эксплуатации для осуществления контрольно-надзорных функций. Снижение количества аварий и случаев травмирования при эксплуатации башенных кранов может быть достигнуто только при условии открытого взаимодействия персонала, руководства предприятия и надзорных органов.

Библиографический список

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 07.03.2017) (с изм. и доп., вступ. в силу с 25.03.2017) [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технический документации. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/9046058 (дата обращения : 15.02.2019).

2. Махутов, Н. А. Структура основных расчетов для определения исходного и остаточного ресурса безопасной эксплуатации / Н. А. Махутов, М. М. Гаденин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2018. — № 2. — С. 21–33.

3. О внесении изменений в Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12 ноября 2013 года № 533 [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технический документации. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/420351983 (дата обращения : 15.02.2019).

4. О внесении изменений в Федеральный закон «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технический документации. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/552008582 (дата обращения : 17.02.2019).

5. О государственной информационной системе "Типовое облачное решение по автоматизации контрольной (надзорной) деятельности" (с изменениями на 20 ноября 2018 года)» [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технический документации. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/557244991 (дата обращения : 18.02.2019).

6. Об Основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу : указ Президента Российской Федерации от 6 мая 2018 г. №198 / Электронный фонд правовой и нормативно-технический документации. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/557306107 (дата обращения : 18.02.2019).

7. Короткий, А. А. Мониторинг производственного контроля, аварийности и опасности ОПО IV класса при эксплуатации башенных кранов / А. А. Короткий, А. В. Кинжибалов, А. А. Кинжибалов // Мониторинг. Наука и технологии. — 2017. — №4(33). — С. 80–85.

8. Короткий, А. А. Совершенствование современных систем безопасности башенных кранов на основе цифровых технологий в условиях риск-ориентированного надзора А. А. Короткий, А. В. Панфилов, А. В. Кинжибалов, А. А. Кинжибалов / Наука и бизнес: перспективы развития. — 2018. — №7. — С. 46–54.
9. Егельская, Е. В. Оценка риска человеческого фактора в системе «персонал- подъемные механизмы-производственная среда» на предприятиях машиностроения : автореф. дис. … канд. техн. наук / Е. В. Егельская. — Ростов-на-Дону, 2015. — 20 с.

Поступила в редакцию 10.10.2018
Сдана в редакцию 12.10.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 10.10.2018
Submitted 12.10.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторах:

Егельская Елена Владимировна,
Доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3864-9254
egelskaya72@mail.ru

Короткий Анатолий Аркадьевич,
заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9446-4911
korot@novoch.ru

Панфилова Эльвира Анатольевна,
доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат философских наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8485-5983
korotkaya_elvira@mail.ru

Кинжибалов Александр Александрович,
аспирант кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1742-9407
kinzha@gmail.com

Authors:

Yegelskaya, Elena V.,
associate professor of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3864-9254
egelskaya72@mail.ru

Korotkiy, Anatoly A.,
Head of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9446-4911
korot@novoch.ru

Panfilova, Elvira A.,
associate professor of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Phylosophy),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8485-5983
korotkaya_elvira@mail.ru

Kinzhibalov, Alexander A.,
postgraduate of the Transport Systems Operation and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1742-9407
kinzha@gmail.com

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 63–73. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 1, pp. 63–73. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006



УДК 004.932.72’1 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-63-73

Модель глубокой сверточной нейронной сети в задаче сегментации трещин на изображениях асфальта*

Б. В. Соболь[1], А. Н. Соловьев[2], П. В. Васильев[3], Л. А. Подколзина[4]**
[1, 2, 3, 4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Deep convolution neural network model in problem of crack segmentation on asphalt images***

B. V. Sobol[1], A. N. Soloviev[2], P. V. Vasiliev[3], L. A. Podkolzina[4]**
[1, 2, 3, 4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Своевременное устранение дефектов (трещин, сколов и пр.) на участках повышенной нагрузки дорожного полотна позволяет снизить риск возникновения аварийных ситуаций. В настоящее время для контроля состояния дорожного покрытия применяются различные методы фото- и видеонаблюдения. Оценка и анализ полученных данных в ручном режиме могут занять недопустимо много времени. Таким образом, необходимо совершенствовать процедуры осмотра и оценки состояния объектов контроля с помощью технического зрения.

Материалы и методы. Авторами предложена модель глубокой сверточной нейронной сети для идентификации дефектов на изображениях дорожного покрытия. Модель реализована как оптимизированный вариант наиболее популярных на данный момент полностью сверточных нейронных сетей (FCNN). Показано построение обучающей выборки и двухэтапный процесс обучения сети с учетом специфики решаемой задачи. Для программной реализации предложенной архитектуры использовались фреймворки Keras и TensorFlow.

Результаты исследования. Применение предложенной архитектуры эффективно даже в условиях ограниченного объема исходных данных. Отмечена высокая степень повторяемости результатов.

Модель может быть использована в различных задачах сегментации. Согласно метрикам, FCNN показывает следующие результаты идентификации дефектов: IoU — 0,3488, Dice — 0,7381.

Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в процессе мониторинга, моделирования и прогнозирования процессов износа дорожных покрытий.

Introduction. Early defect illumination (cracks, chips, etc.) in the high traffic load sections enables to reduce the risk under emergency conditions. Various photographic and video monitoring techniques are used in the pavement managing system. Manual evaluation and analysis of the data obtained may take unacceptably long time. Thus, it is necessary to improve the conditional assessment schemes of the monitor objects through the autovision.

Materials and Methods. The authors have proposed a model of a deep convolution neural network for identifying defects on the road pavement images. The model is implemented as an optimized version of the most popular, at this time, fully convolution neural networks (FCNN). The teaching selection design and a two-stage network learning process considering the specifics of the problem being solved are shown. Keras and TensorFlow frameworks were used for the software implementation of the proposed architecture.

Research Results. The application of the proposed architecture is effective even under the conditions of a limited amount of the source data. Fine precision is observed. The model can be used in various segmentation tasks. According to the metrics, FCNN shows the following defect identification results: IoU - 0.3488, Dice - 0.7381.

Discussion and Conclusions. The results can be used in the monitoring, modeling and forecasting process of the road pavement wear.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, идентификация дефектов, сегментация, дорожное покрытие, трещины, IoU, Dice.

Keywords: artificial neural networks, defect identification, segmentation, road pavement, cracks, IoU, Dice.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-08-00074, 18-31-00024, 16-01-00390.
**E-mail: b.sobol@mail.ru, solovievarc@gmail.com, lyftzigen@mail.ru, podkolzinalu@gmail.com
***The research is done on RFFI grants nos. 19-08-00074, 18-31-00024, 16-01-00390.

***Образец для цитирования*:** Модель глубокой сверточной нейронной сети в задаче сегментации трещин на изображениях асфальта / Б. В. Соболь [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 63–73. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-63-73

For citation: B.V. Sobol, et al. Deep convolution neural network model in problem of crack segmentation on asphalt images. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 63–73 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-63-73

Введение. Износ дорожного покрытия требует регулярного контроля. Эффективные стратегии мониторинга позволяют своевременно обнаруживать проблемные участки. Такой подход значительно повышает эффективность технического обслуживания дорог, сокращает расходы на их содержание и обеспечивает непрерывную эксплуатацию. Технологии выявления критических признаков состояния дорожного покрытия эволюционировали от ручных методов фотофиксации до использования высокоскоростной цифровой техники [1].

Россия входит в пятерку стран с наибольшей протяженностью автомобильных дорог. Для фото- и видеомониторинга столь масштабной инфраструктуры необходимы системы одновременно оперативные, надежные и простые в использовании. Очевидно, что в данном случае речь не идет о решениях, предполагающих анализ данных в ручном режиме. Такой подход неприемлем из-за значительных временных затрат на обработку информации и невысокого качества анализа.

Авторы данной работы предлагают новое технологическое решение в сфере машинного обучения. Его реализация позволяет автоматизировать процесс оценки качества дорожного покрытия. С этой целью сверточная нейронная сеть обучается на данных, размеченных вручную. Таким образом система учится распознавать и оценивать основные виды повреждений объектов контроля.

Обзор литературы. Многие исследования посвящены совершенствованию алгоритмов обнаружения дефектов в деталях конструкций и на объектах инфраструктуры. Для решения указанной задачи широко используются возможности компьютерного зрения. Их постоянное совершенствование поддерживается развитием технологий зондирования, прогрессом в аппаратном и программном обеспечении. Однако следует признать, что в настоящее время компьютерное зрение используется ограниченно. Это обусловлено многими факторами, в числе которых:

— неоднородность дефектов,
— разнообразие типов поверхностей,
— сложность фона,
— примыкания.

Авторы ряда публикаций исследуют автоматизированные методы обнаружения трещин на изображениях и предлагают собственные решения [2–9]. В некоторых работах рассматривается специфика мониторинга объектов дорожно-транспортной инфраструктуры [10, 11], а также мостов и сооружений [12, 13].

До недавнего времени для решения указанных задач использовались в основном ручные техники мониторинга, такие, как:

— морфологические операции [13],
— анализ геометрических особенностей [6],
— применение фильтров Габора [14],
— вейвлет-преобразования [15],
— построение гистограмм ориентированных градиентов (HOG, histograms oriented gradients) [16],
— текстурный анализ,
— машинное обучение [4].

Однако сейчас перечисленный инструментарий используется все реже. Его вытесняет глобальное распространение нейросетевых технологий и машинное обучение, поддерживаемое вычислительными мощностями графических процессоров.

Сверточная нейронная сеть (CNN, convolutional neural network) — это многослойная архитектура искусственной нейронной сети, специально предназначенная для работы с изображениями [17]. В этом случае слой субдискретизации (pooling layer) позволяет реализовать локальные восприимчивые поля через сверточные слои и инвариантность относительно малых геометрических деформаций.

Данная архитектура демонстрирует выдающиеся результаты в решении следующих задач распознавания:

— рукописных цифр [18],
— номеров домов на основе набора данных Google StreeView house number (SVHN) [19],
— дорожных знаков [20].

Рост вычислительных мощностей графических процессоров позволяет использовать более глубокие архитектуры моделей машинного обучения [21]. Появилась возможность избежать переобучения [22]. Этому способствует развитие таких современных техник, как увеличение данных, регуляризация и др.

Совершенствование сверточных нейронных сетей открывает возможность более эффективного изучения и обобщения особенностей изображений (например, классификации изображений [23], поиска объектов [24], обнаружения транспортных средств [25]).

Гибкость и перспективность глубокого обучения для задач автоматического обнаружения трещин дорожного покрытия показана в работах [26, 27].

В [28] рассматривается использование нейронных сетей для автоматического обнаружения и классификации трещин в асфальте. Авторы предлагают использовать среднее значение и дисперсию значений оттенков серого. С учетом этих показателей изображение делится на фрагменты, после чего каждая ячейка классифицируется как трещина. Была показана целесообразность использования дефлектометров с падающим грузом (FWD, fall weight deflectometers) для оценки трещин асфальта. В 98% случаев система эффективно обнаруживает трещину на изображении.

В работе [29] исследовано применение нейронной сети для обнаружения дефектов. Выяснились преимущества метода кластеризации пикселей как объектов. Она позволяет увеличить точность идентификации и уменьшить шум.

В работе [30] авторы использовали архитектуру глубокого обучения, которая включает модель VGG-16. Ее предварительно обучили выявлять особенности, которые позволяют различать классы изображений. Модель продемонстрировала отличное качество распознавания даже в работе с изображениями из неизвестных ей областей. CNN VGG-16 используется в качестве глубокого генератора признаков изображений дорожного покрытия. Авторы обучали только последний слой классификатора. Они провели эксперименты с различными моделями машинного обучения, показали их сильные и слабые стороны.

В работе [31] показано применение CNN в прикладной робототехнической задаче. Речь идет об автономном обнаружении и оценке состояния трещин и повреждений в канализационной трубе. CNN фильтрует данные и локализует трещины, что позволяет получить характеристику их геометрических параметров.

Цель работы [32] — автоматизация последовательного обнаружения сколов и численное представление разрушения в сетях метрополитена. Для этого создается интегрированная модель, реализующая гибридный алгоритм и интерактивное 3D-представление. Прогнозирование глубины сколов поддерживается регрессионным анализом.

В [33] представлены обзор и оценка перспективных подходов, позволяющих автоматически обнаруживать трещины и коррозию в системах гражданской инфраструктуры.

В [34] описана эффективная архитектура на основе CNN для обнаружения трещин дорожного покрытия на трехмерной поверхности асфальта. Архитектура CrackNet обеспечивает высокую точность обработки данных, благодаря оригинальному методу представления геометрии дорожного покрытия. CrackNet состоит из пяти слоев и включает более миллиона обучаемых параметров. Эксперименты с использованием 200 тестовых 3D-изображений показали, что точность CrackNet может достигать 90,13 %.

Предлагаемый метод. Для идентификации дефектов на изображениях дорожного покрытия нужно определить, что является дефектом, а что нет. Иными словами, следует провести сегментацию изображения и выделить соответствующие классы. В последнее время данный тип задач эффективно решается с помощью специально разработанных архитектур сверточных нейронных сетей, таких, как: SegNet [35], U-Net [36].

Специфика изображений дорожного покрытия заключается в небольшом диапазоне оттенков серого цвета и незначительной разнице между фоном и целевым объектом. Кроме того, задачу усложняют шумы, дефекты и наличие на изображении посторонних объектов.

Используются различные наборы данных, на которых обучаются нейронные сети [7, 37]. В эти наборы входят оригинальные изображения дорожного покрытия и соответствующие им изображения-маски с дефектами или без них. Изображения с дефектами на дорожном покрытии специфичны, поэтому авторы предлагают собственную упрощенную модель глубокой сверточной нейронной сети. Для сегментации изображения предлагается полностью сверточная нейронная сеть (FCNN, fully convolutional neural network) [38] со структурой «энкодер — декодер». На вход системы подается изображение дорожного покрытия, а на выходе получается бинарное изображение. В результате создается сегментированное изображение, показывающее наличие или отсутствие дефектов.

Архитектура глубокой сверточной нейронной сети. На рис. 1 показана архитектура предлагаемой глубокой сверточной нейронной сети.

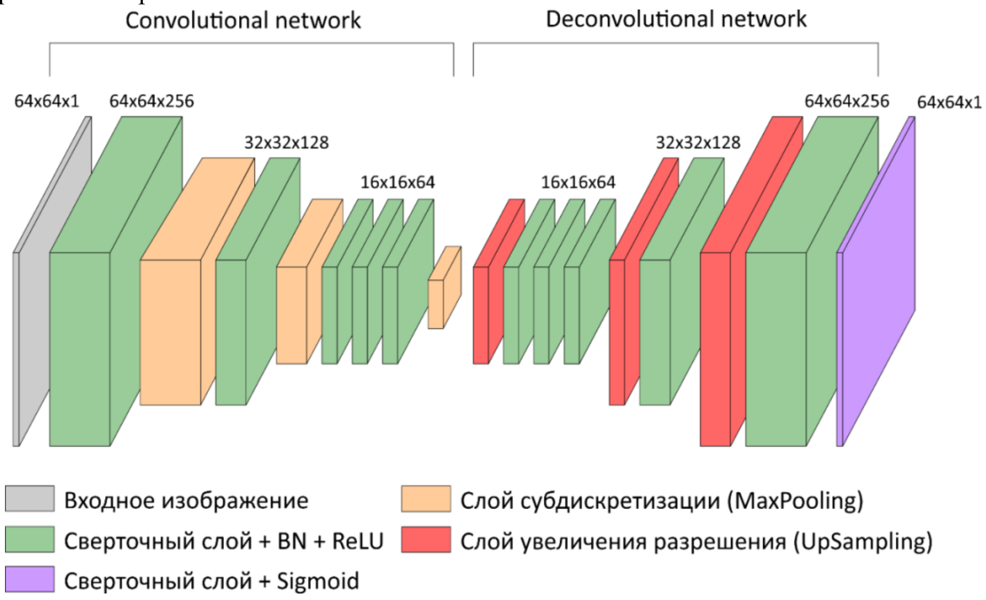


Рис. 1. Архитектура предложенной сети

Нейронная сеть стоит из двух частей — сверточной и разверточной. Сверточная часть преобразует входное изображение в многомерное представление признаков. Иными словами, она выполняет функцию извлечения признаков. Разверточная сеть играет роль генератора, который создает сегментированное изображение на основе признаков, полученных от сверточной сети. Последний сверточный слой сети с сигмовидной активационной функцией генерирует сегментированное изображение — карту вероятностей наличия дефекта такого же размера, что и на входном изображении.

Первая часть сети состоит из пяти сверточных слоев с наборами фильтров (256, 128, 64, 64, 64). Применяется инструмент «нормализация партии» (BN, batch normalization) [39]. В качестве активационных функций используется «выпрямитель» (ReLU, rectified linear unit). Далее следуют слои субдискретизации (pooling) с окном 2×2. Проходя через этот слой, изображение уменьшается в два раза. Вторая часть сети является зеркальным отражением первой. Размер изображения необходимо восстановить до исходного и сформировать карту вероятностей, основываясь на признаках входного изображения. С этой целью применяются слои повышающей дискретизации (upsampling-слои) в комбинации со сверточными слоями. Предложенная нейронная сеть имеет 10 сверточных слоев и 929 665 обучаемых параметров.

Подготовка набора данных. Для обучения построенной модели используется набор данных CrackForest [7]. Проводится его аугментация (искусственное увеличение набора данных), так как обучение и работа нейронной сети основана на path-based подходе, который предполагает использование вырезанных случайным образом элементов исходных изображений.

Итак, набор данных состоит из 117 изображений. Он разделяется на обучающую, тестовую и валидационную выборки. Для каждого изображения из обучающей и тестовой выборки случайно выбираются фрагменты размером 64×64. Исследования показали, что в рамках поставленной задачи гамма-коррекция изображений повышает качество работы нейронной сети. Каждый фрагмент изображения подвергается вращению, отражению и деформации. Было установлено оптимальное соотношение фраг-

ментов с дефектом и без него: 95 % к 5 %. При этом учитываются дефекты, которые занимают не менее 5 % площади изображения. Размер выборки влияет на процесс обучения и качество работы сети. Установлено оптимальное соотношение: 15 200 фрагментов обучающей выборки и 3 968 тестовой. На рис. 2 показаны изображения и соответствующие им маски, применяемые для обучения нейронной сети.

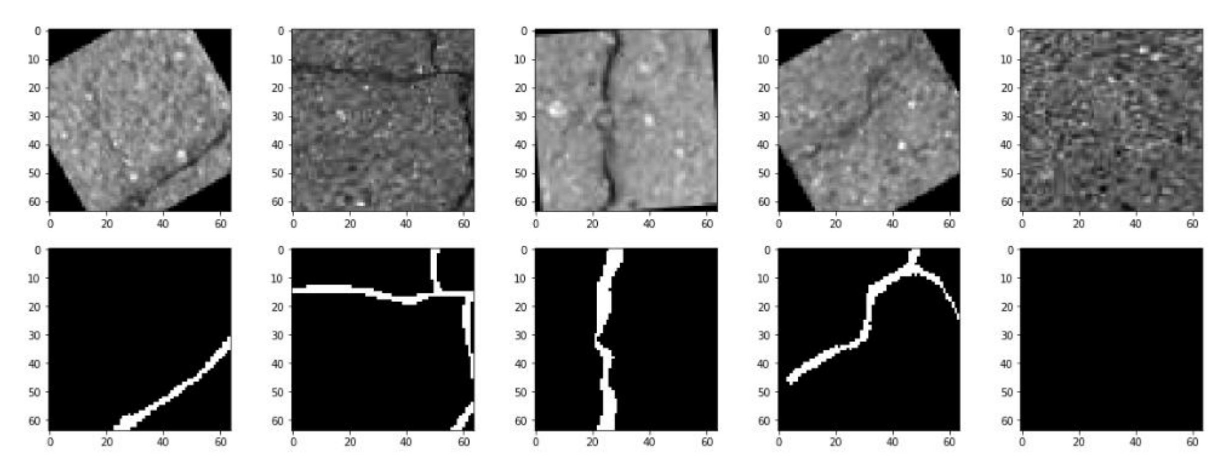


Рис. 2. Изображения и соответствующие им бинарные маски, полученные в результате аугментации данных

Обучение нейронной сети. Для обучения и оценки работы нейронной сети применяются метрики пересечения между двумя обнаружениями (intersection over union, IoU, коэффициент Жаккара) и эквивалентная бинарная мера схожести (dice, мера Сёренсена). В качестве функции потерь используется функция $1 - J$:

$$J(A,B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, S(A,B) = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|}.$$

Инициализация весов в слоях нейронной сети осуществляется методом Глорота [40]. Для уменьшения внутреннего ковариационного сдвига выполняется нормализация партии путем нормализации входных распределений каждого слоя. Для обучения используется Adam-алгоритм (метод стохастической оптимизации) [41].

На первом этапе нейронная сеть обучается на небольшом объеме данных (30 % от основного набора) в течение 5 эпох. На втором этапе сеть обучается на полном объеме данных необходимое количество эпох. Коэффициент скорости обучения (learning rate) изменяется с каждой эпохой по установленной зависимости (рис. 3).

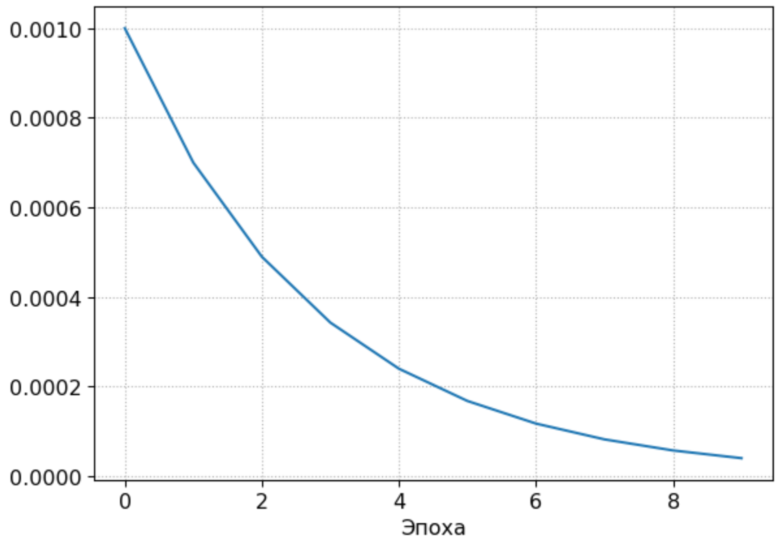


Рис. 3. Изменение коэффициента скорости обучения сети в зависимости от эпохи

В рамках поставленной задачи установлено, что оптимальное количество эпох обучения равно 25 (5 эпох на первом этапе обучения и 20 — на втором). При большем количестве эпох точность работы нейронной сети существенно не менялась.

Для реализации разработанной архитектуры глубокой CNN использованы фреймворки Keras и TensorFlow.

Результаты исследования. После обучения нейронной сети производится валидация на тестовых данных. Каждый фрагмент изображения подается на вход сети, а на выходе получается сгенерированная карта вероятностей наличия дефекта. На рис. 4 показаны результаты работы обученной сети и их сравнение с истинными значениями из тестовой выборки.

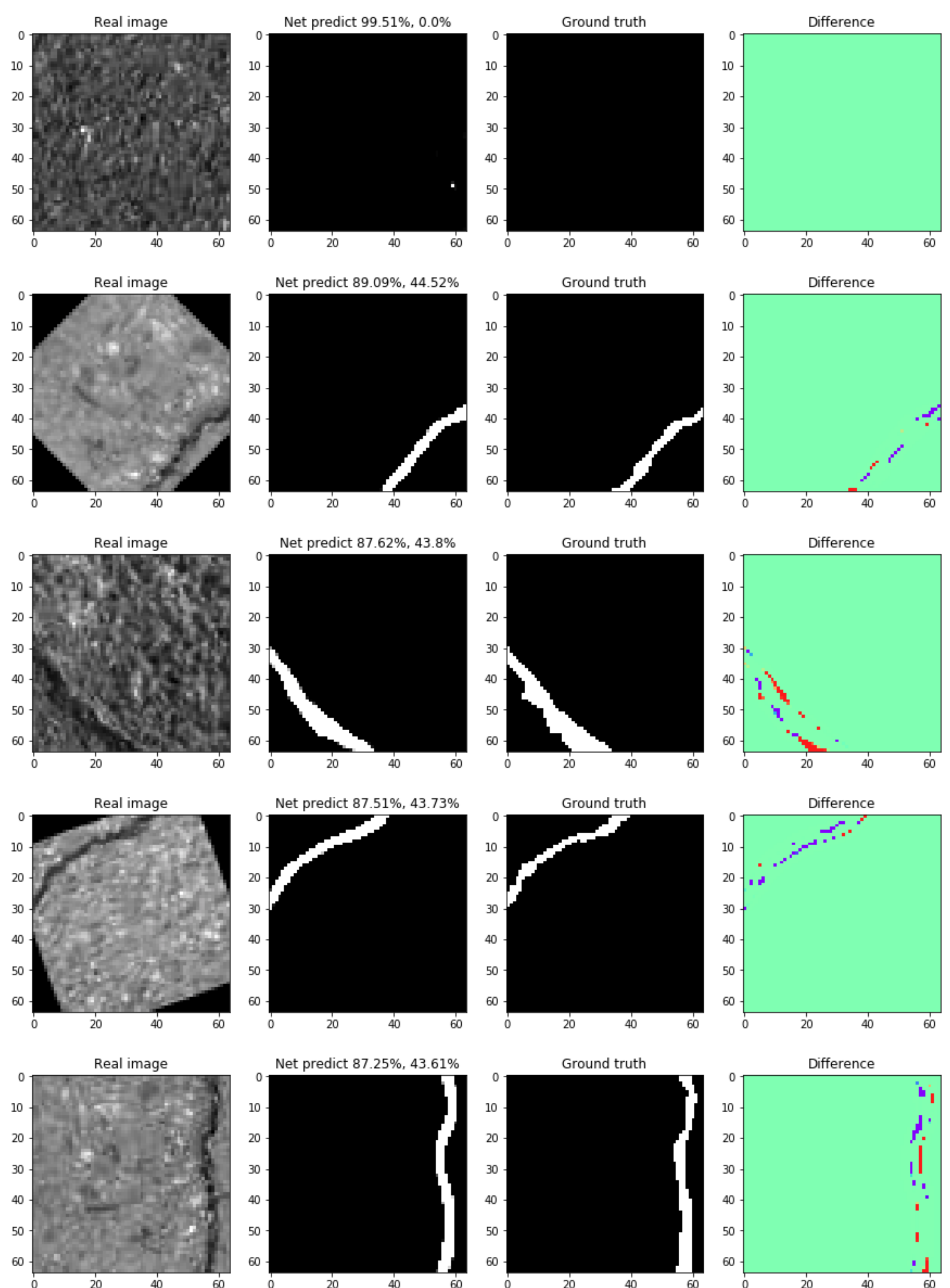


Рис. 4. Результаты работы обученной нейронной сети

На рис. 4 данные разнесены в четыре столбца:

1) исследуемое изображение,

2) результат работы нейронной сети,

3) дефект, выделенный человеком вручную,

4) разница между 2) и 3).

Предположения сети сравниваются с истинными значениями. Значения метрик IoU и Dice обусловлены специфическими соотношениями следующих факторов:

— площади дефекта и площади всего изображения,

— двоичной (однобитовой) маски и действительного (4-байтового) генерируемого изображения.

Стоит отметить, что при использовании IoU для фрагментов без дефекта значения метрики равны 0 (рис. 5).

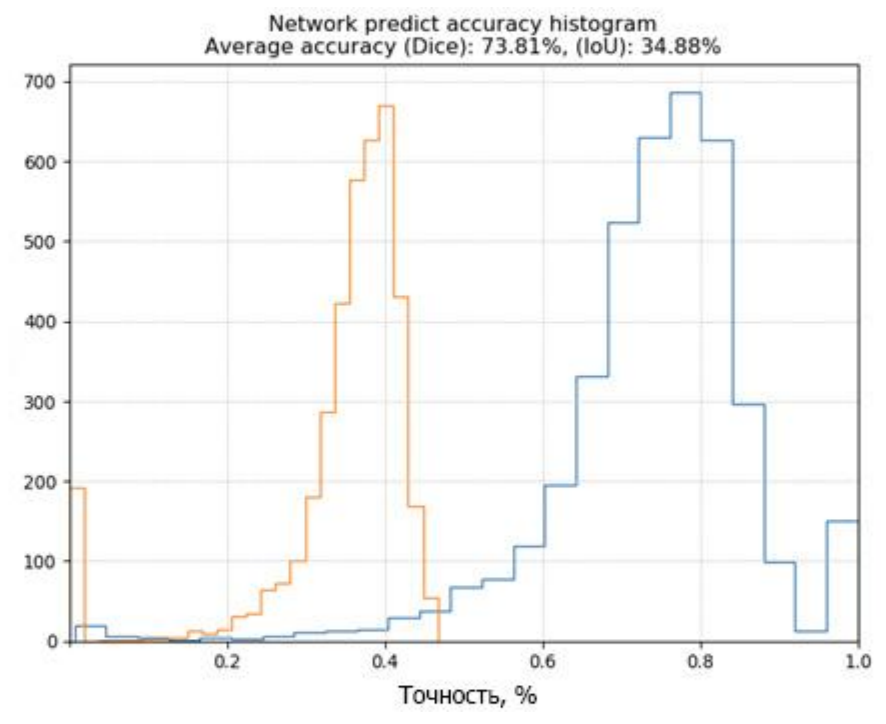


Рис. 5. Количество изображений, идентифицированных с определенной точностью

Качество подготовленного набора данных существенно влияет на обучение и результат работы нейронной сети. В некоторых случаях нейронная сеть указывает на дефект, хотя его нет на истинном изображении, или наоборот. Это сказывается на общей оценке качества работы модели. В целом, оценка точности работы нейронной сети по предложенным метрикам может быть субъективной, поэтому не стоит воспринимать данные рис. 4 как абсолютные.

В рамках представленной работы оценены некоторые модели FCN-сетей. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Точность работы некоторых моделей нейронных сетей

Архитектура сети	Точность работы
10 слоев (256, 128, 64, 64, 64, …), 929 665 параметров	Dice: 73,81 %, IoU: 34,88 %
16 слоев (32, 32, 16, 16, 16, 8, 8, 8, …), 43 441 параметров	Dice: 70,40 %, IoU: 33,24 %
12 слоев (32, 32, 16, 16, 8, 8, …), 37 537 параметров	Dice: 67,57 %, IoU: 32,12 %

Здесь в скобках указано количество фильтров на первой части сети. Количество фильтров на второй части сети зеркально отражено (рис. 1).

Для обработки изображений высокого разрешения применяется метод скользящего окна с заданным шагом, регулирующим скорость обработки и детализацию — так формируется результирующая карта вероятностей наличия дефекта для всего изображения. Несколько изображений из валидационного набора и результат обработки их нейронной сетью представлены на рис. 6.

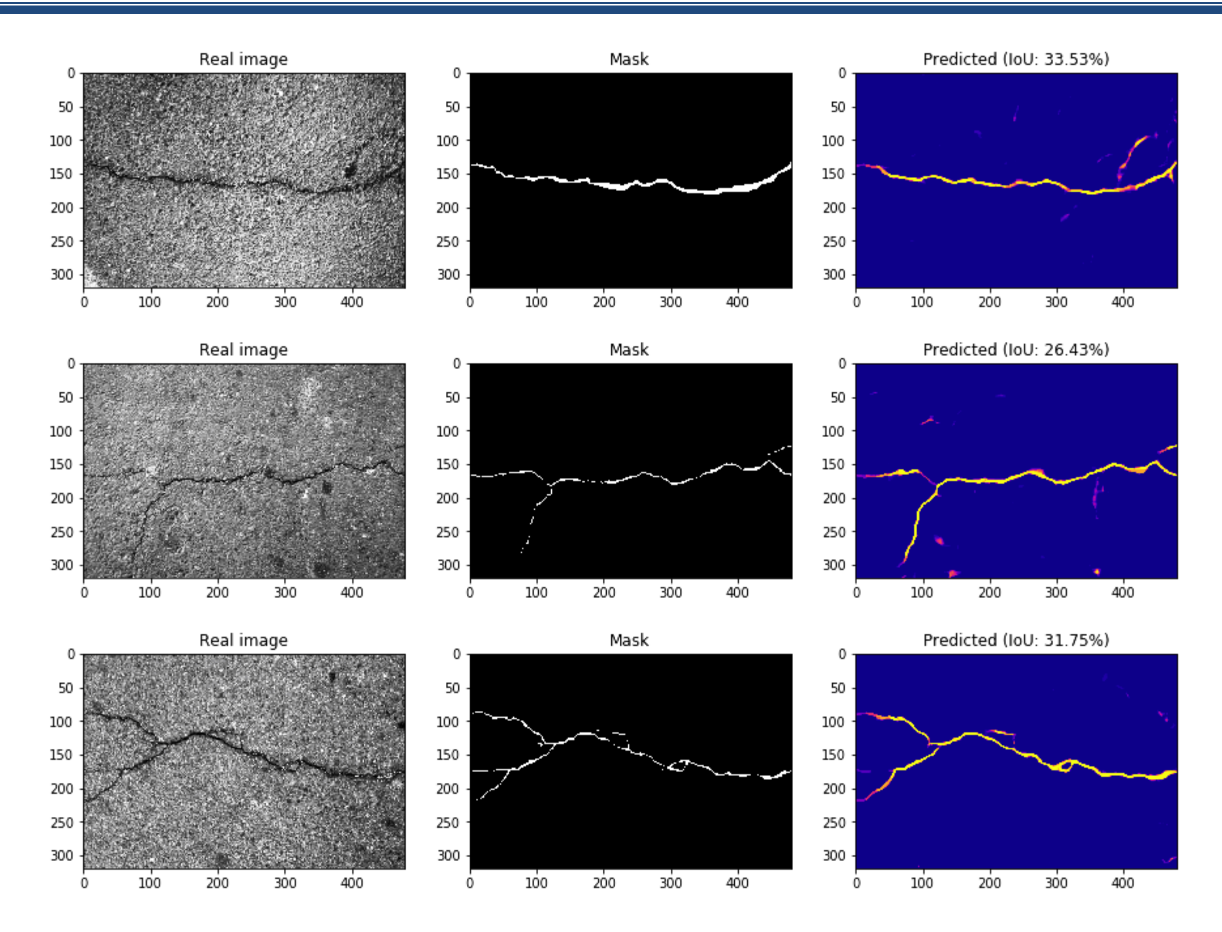


Рис. 6. Валидационные изображения, обработанные обученной FCN

Обсуждение и заключения. Предложена модель глубокой сверточной нейронной сети для идентификации дефектов на изображениях дорожного покрытия. Модель реализована как упрощенный и оптимизированный вариант FCN-сетей, наиболее популярных на данный момент. Представлены техники построения обучающей выборки и двухэтапного процесса обучения сети с учетом специфики решаемой задачи. Проделанная работа показала, что применение подобных архитектур успешно при небольшом количестве исходных данных. Отмечена высокая степень повторяемости результатов. Описанная модель может быть использована в различных задачах сегментации. Согласно метрикам, FCNN показывает следующие результаты: IoU — 0,3488, Dice — 0,7381.

Библиографический список

1. Quality Management of Pavement Condition Data Collection / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. — Washington : The National Academies Press, 2009. — 144 p. DOI: https://doi.org/10.17226/14325 .

2. Pavement Distress Analysis Using Image Processing Techniques / D. S. Mahler [et al.] // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. — 1991. — Vol. 6, iss. 1. — P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.1991.tb00393.x .

3. Tizhoosh, H. R. Locally adaptive fuzzy image enhancement / H. R. Tizhoosh, G. Krell, B. Michaelis // Computational Intelligence Theory and Applications. Fuzzy Days 1997. Lecture Notes in Computer Science. — Berlin ; Heidelberg : Springer, 1997. — Vol. 1226. — P. 272–276. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-62868-1_118 .

4. Crack Tree: Automatic crack detection from pavement images / Q. Zou [et al.] // Pattern Recognition Letters. — 2012. — Vol. 33. — P. 227–238. DOI: 10.1016/j.patrec.2011.11.004 .

5. Pavement crack detection based on saliency and statistical features / W. Xu [et al.] // IEEE International Conference on Image Processing. — 2013. — Melbourne : IEEE, 2013. — P. 4093–4097. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIP.2013.6738843 .

6. Oliveira, H. CrackIT — An Image Processing Toolbox for Crack Detection and Characterization / H. Oliveira, P. L. Correia // IEEE International Conference on Image Processing — ICIP 2014. — Paris : IEEE, 2014. — P. 798–802. DOI: http://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7025160 .

7. Automatic Road Crack Detection Using Random Structured Forests / Y. Shi [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2016. — Vol. 17, iss. 12. — P. 3434–3445. DOI: https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2552248 .

8. Lee, B. J. Position-Invariant Neural Network for Digital Pavement Crack Analysis / B. J. Lee, H. Lee // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. — 2004. — Vol. 19, iss. 2. — P. 105–118. DOI: http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8667.2004.00341.x .

9. Sun, B.-C. Automatic Identification of Pavement Cracks Using Mathematic Morphology / B.-C. Sun, Y.-J. Qiu // First International Conference on Transportation Engineering. — Chengdu : ASCE, 2007. — P. 1783–1788. — DOI: https://doi.org/10.1061/40932(246)292 .

10. Chambon, S. Detection of road cracks with multiple images / S. Chambon // International Joint Conference on Computer Vision Theory and Applications, VISAPP. — Angers : Springer, 2010. — 7 p.

11. Zhang, L. Road crack detection using deep convolutional neural network / L. Zhang [et al.] // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP-2016). — Phoenix : IEEE, 2016. — P. 3708–3712. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7533052 .

12. Automated Crack Detection on Concrete Bridges / P. Prasanna [et al.] // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. — 2014. — Vol. 13, iss. 2. — P. 591–599. DOI: https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2354314 .

13. An innovative methodology for detection and quantification of cracks through incorporation of depth perception / M.-R. Jahanshahi [et al.] // Machine Vision and Applications. — 2013. — Vol. 24. — P. 227–241. DOI: https://doi.org/10.1007/s00138-011-0394-0 .

14. Enhanced automatic detection of road surface cracks by combining 2D/3D image processing techniques / R. J. Medina [et al.] // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP-2014). — Paris : IEEE, 2014. — P. 778–782. https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7025156 .

15. Automatic Bridge Crack Detection — A Texture Analysis-Based Approach / S. Chanda [et al.] // Artificial Neural Networks in Pattern Recognition (ANNPR) : Lecture Notes in Computer Science. — Cham : Springer, 2014. — Vol. 8774. — P. 193–203. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11656-3_18 .

16. Asphalt Surfaced Pavement Cracks Detection Based on Histograms of Oriented Gradients / R. Kapela [et al.] // 22-nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems. — Moscow : ALT Linux, 2015. — P. 579–584. DOI: https://doi.org/10.1109/MIXDES.2015.7208590 .

17. Gradient-based learning applied to document recognition / Y. LeCun [et al.] // Proceedings of the IEEE. — 1998. — Vol. 86, iss. 11. — P. 2278–2324. DOI: https://doi.org/10.1109/5.726791 .

18. Ciresan, D. Multi-column deep neural networks for image classification / D. Ciresan, U. Meier, J. Schmidhuber // Proc. of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — Providence : IEEE, 2012. — P. 3642–3649. DOI: https://arxiv.org/abs/1202.2745 .

19. Multi-digit number recognition from street view imagery using deep convolutional neural networks / I. J. Goodfellow [et al.] // Proc. of International Conference on Learning Representations (ICLR). — Banff : Deep Learning, 2014. — P. 1–12. DOI: https://arxiv.org/abs/1312.6082 .

20. A committee of neural networks for traffic sign classification / D. Ciresan [et al.] // Proc. of International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). — San Jose : IEEE, 2011. — P. 1918–1921. DOI: http://doi.org/10.1109/IJCNN.2011.6033458 .

21. Arel, I. Deep machine learning — a new frontier in artificial intelligence research / I. Arel, D. C. Rose, T. P. Karnowski // IEEE Computational Intelligence Magazine. — 2010. — Vol. 5, iss. 4. — P. 13–18. DOI: http://doi.org/10.1128/IAI.02190-14 .

22. Simard, P. Y. Best practices for convolutional neural networks applied to visual document analysis / P. Y. Simard, D. Steinkraus, J. C. Platt // Proc. of International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). — Edinburgh : IEEE, 2003. — P. 958–963. DOI: http://doi.org/10.1109/ICDAR.2003.1227801 .

23. Going deeper with convolutions / C. Szegedy [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — Boston : IEEE, 2015. — P. 1–9. DOI: http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/CVPR.2015.7298594 .

24. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation / R. Girshick [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — Columbus IEEE, 2014. — P. 580–587. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81 .

25. Vehicle Detection in Satellite Images by Hybrid Deep Convolutional Neural Networks / X. Chen [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2014. — Vol. 11, iss. 10. — P. 1797–1801. DOI: 10.1109/ACPR.2013.33 .

26. Some, L. Automatic image-based road crack detection methods / L. Some. — Stockholm : Royal Institute of Technology, 2016. — 61 p.

27. Xie, D. Deep learning in visual computing and signal processing / D. Xie, L. Zhang, L. Bai // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. — 2017. — Vol. 2017 (10). — P. 1–13. DOI: https://doi.org/10.1155/2017/1320780 .

28. Saar, T. Automatic Asphalt pavement crack detection and classification using Neural Networks / T. Saar, O. Talvik // 12th Biennial Baltic Electronics Conference. — Tallinn : IEEE, 2010. — P. 345–348. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/BEC.2010.5630750 .

29. Meignen, D. One application of neural networks for detection of defects using video data bases: identification of road distresses / D. Meignen, M. Bernadet, H. Briand // Database and Expert Systems Applications : Proc. 8th International Workshop in Toulouse, France. — Berlin ; Heiderberg : Springer-Verlag, 1997. — P. 459–464. DOI: https://doi.org/10.1109/DEXA.1997.617332 .

30. Deep Convolutional Neural Networks with transfer learning for computer vision-based data-driven pavement distress detection / K. Gopalakrishnan [et al.] // Construction and Building Materials. — 2017. — Vol. 157. — P. 322–330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.110 .

31. Browne, M. Convolutional Neural Networks for Image Processing: An Application in Robot Vision / M. Browne, S. S. Ghidary // AI 2003: Advances in Artificial Intelligence. — Berlin ; Heidelberg : Springer, 2003. — Vol. 2903. — P. 641–652. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24581-0_55 .

32. Dawood, T. Machine vision-based model for spalling detection and quantification in subway networks / T. Dawood, Z. Zhu, T. Zayed // Automation in Construction. — 2017. — Vol. 81. — P. 149–160. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.008 .

33. A survey and evaluation of promising approaches for automatic image-based defect detection of bridge structures / M. R. Jahanshahi [et al.] // Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance. — 2009. — Vol. 5, iss. 6. — P. 455–486. DOI: https://doi.org/10.1080/15732470801945930 .

34. Automated Pixel-Level Pavement Crack Detection on 3D Asphalt Surfaces Using a Deep-Learning Network / A. Zhang [et al.] // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. — 2017. — Vol. 32, iss. 10. — P. 805–819. DOI: https://doi.org/10.1111/mice.12297 .

35. Badrinarayanan, V. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation / V. Badrinarayanan, A. Kendall, R. Cipolla // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2017. — Vol. 39, iss. 12. — P. 2481–2495. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2644615.

36. Ronneberger, O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention — MICCAI 2015. — Cham : Springer, 2015. — Vol. 9351. — P. 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.

37. How to Get Pavement Distress Detection Ready for Deep Learning? A Systematic Approach / M. Eisenbach [et al.] // IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). — Anchorage : IEEE. — 2017. — P. 2039–2047. DOI: http://doi.org/10.1109/IJCNN.2017.7966101 .

38. Shelhamer, E. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation / E. Shelhamer, J. Long, T. Darrell // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2017. — Vol. 39, iss. 4. — P. 640–651. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2572683.

39. Ioffe, S. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift / S. Ioffe, C. Szegedy // Computing Research Repository. — 2015. — 9 p. DOI: abs/1502.03167.

40. Glorot, X. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks / X. Glorot, Y. Bengio // AlSTATS. — 2010. — Vol. 9. — P. 249–256.

41. Diederik, P. K. Adam: A Method for Stochastic Optimization / P. K. Diederik, J. Ba // International Conference on Learning Representations. — Banff : IEEE, 2014. — 15 p.

Поступила в редакцию 02.11.2018
Сдана в редакцию 02.11.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 02.11 .2018
Submitted 02.11.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторах:

Соболь Борис Владимирович,
заведующий кафедрой «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2920-6478
b.sobol@mail.ru

Соловьев Аркадий Николаевич,
заведующий кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID:http://orcid.org/0000-0001-8465-5554
solovievarc@gmail.com

Васильев Павел Владимирович,
старший преподаватель кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4112-7449
lyftzeigen@mail.ru

Подколзина Любовь Александровна,
Аспирант 2-го года обучения кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9476-5802
podkolzinalu@@gmail.com

Authors:

Sobol, Boris V.,
Head of the Information Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2920-6478
b.sobol@mail.ru

Soloviev, Arkady N.,
Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554
solovievarc@gmail.com

Vasiliev, Pavel V.,
Senior lecturer of the Information Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4112-7449
lyftzeigen@mail.ru

Podkolzina, Lubov A.,
Post-graduate student of the Information Technologies Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9476-5802
podkolzinalu@@gmail.com

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 74–80. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 1, pp. 74–80. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 62-50 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80

Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации*

А. К. Тугенгольд[1], Р. Н. Волошин[2], А. Р. Юсупов[3], Т. Н. Круглова[4]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[4] Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

Production machines maintenance based on digitalization***

A. K. Tugengold[1], R. N. Voloshin[2], A. R. Yusupov[3], T. N. Kruglova[4]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[4] Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Введение. Цифровые данные и аналитика преобразуют роль технического обслуживания производственного оборудования. Аналитическая информация датчиков, размещенных на изделии, позволяет непрерывно наблюдать функционирование технологических машин и своевременно обслуживать их. Так, выявляются дефекты технического оснащения, анализ которых позволяет разрабатывать алгоритмы мониторинга, прогнозирования и предупреждать выход оборудования за пределы надежной работы.
Материалы и методы. Представлены основные принципы цифровизации и структура построения цифровых образов. Используется математический метод описания вектора цифровых образов и алгоритмизации системы управления.
Результаты исследования. Обобщены достижения известных систем технического обслуживания и цифровизации различных машин. Использование динамического цифрового образа позволило определить необходимые уровни для поддержания работоспособности технологических объектов. Показан возможный вариант мониторинга состояния оборудования в рамках концепции цифровизации производства. Он основан на предложенном алгоритме автономного управления технологическим состоянием.
Обсуждение и заключение. Описано построение цифровых образов станка в соответствии с основными стадиями его жизненного цикла. Рассмотрена задача автоматизированного поддержания работоспособности станков на базе цифровизации.

Introduction. Digital data and analytics transform the role of the production equipment maintenance. Analytical information of sensors placed on the product allows continuous monitoring of the production machines operation and their timely servicing. Thus, defects in technical equipment are identified, the analysis of which enables to develop algorithms for monitoring and forecasting, and to prevent equipment from overshooting the limits of the safe operation.
Materials and Methods. Basic digitalization principles and the digital images structure are presented. A mathematical method is used to describe the digital image vector and the control system algorithm.
Research Results. The achievements of the known systems of maintenance and digitalization of various machines are summarized. The application of a dynamic digital image made it possible to determine the desired levels of the production facilities maintenance. An optional version of monitoring the equipment state within the framework of the production digitalization concept is shown. It is based on the proposed algorithm for an autonomous control of the process state.
Discussion and Conclusions. The construction of machine digital images in accordance with the main stages of its life cycle is described. The task of automated maintenance of machine tools based on digitalization is considered.

Ключевые слова: мониторинг, цифровизация, автономное управление, обслуживание, цифровой образ.

Keywords: monitoring, digitalization, autonomous control, maintenance, digital image.



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: akt0@yandex.ru, r.voloshin2909@gmail.com, sthedgehog@icloud.com, kruglovatanya@rambler.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации / А. К. Тугенгольд [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 74–80. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80

For citation: A.K. Tugengold, et al. Production machines maintenance based on digitalization. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 74–80. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80

Введение. На современном этапе развития техники и технологий все чаще поднимаются вопросы цифровизации производства, в частности управления жизненным циклом технологических машин, автономности управления их эксплуатацией и обслуживанием. По словам К. Шваба, руководителя Всемирного экономического форума, цифровые данные и аналитика преобразуют роль технического обслуживания [1]. Речь идет об аналитической информации датчиков, размещенных на изделии. С ее помощью проводится постоянный мониторинг, изучение работы оборудования и его обслуживание. Так, выявляются дефекты технического оснащения, анализ которых позволяет разрабатывать алгоритмы мониторинга, прогнозирования и предупреждать выход оборудования за пределы надежной работы. Такой подход в целом повышает эффективность производственных процессов. Описание функционирования изделия на основе цифровизации позволяет создавать цифровые двойники машин различного назначения. В понятии «цифровой двойник» объединяются темпоральная информационная копия объекта, искусственный интеллект, информационные технологии и программное обеспечение. Все эти элементы участвуют в создании и поддержке интеллектуальных цифровых моделей (ЦМ) сложных технических изделий.

Публикации, посвященные данной теме, представляют исследования в области интеллектуального мониторинга и управления техническим состоянием станков и станочных систем [2–14].

Металлорежущие станки наделяются новыми свойствами, позволяющими удовлетворять растущим требованиям по скорости и точности резания, надежности и безопасности функционирования в условиях быстропротекающих процессов. Как и в мехатронике в целом, в станочных объектах реализуется ряд организационных и технологических принципов, связанных с цифровизацией. Ниже перечислены некоторые из них.

Открытость и управляемость. Станок — открытая самоуправляемая система, связанная с внешней средой. Для управления используется информация о состоянии оборудования, внешней среды и моделируется поведение объекта.

Оригинальность свойств целостной системы станка. Характеристика системного объекта не исчерпывается суммой характеристик его компонентов. Система получает свойства, которыми не обладает ни один из ее компонентов. Иными словами, функции элементов могут синтезировать новые свойства системы.

Автономность системы. Система и ее элементы могут функционировать независимо от внешних систем.

Интеллектуальность управления. Процедуры управления объектом (станком) основываются на анализе его состояний и производственных ситуаций с использованием информационных технологий и механизмов обработки знаний.

Информационное и интеллектуальное сопровождение эксплуатации станка включает процедуры обслуживания, поддержки работоспособности и ремонта. Развитие цифровых автоматизированных систем диагностики и контроля подразумевает создание специфических программных средств обработки информации, интегрированных с внешней сетевой коммуникационной средой.

Основная часть. В представленной статье цифровое воплощение объекта будем называть его цифровым образом (ЦО).

ЦО станка соответствуют различные методы построения цифровых моделей (Digital model). Выбор модели определяется стадией жизненного цикла объекта — от проектирования до утилизации (рис. 1).

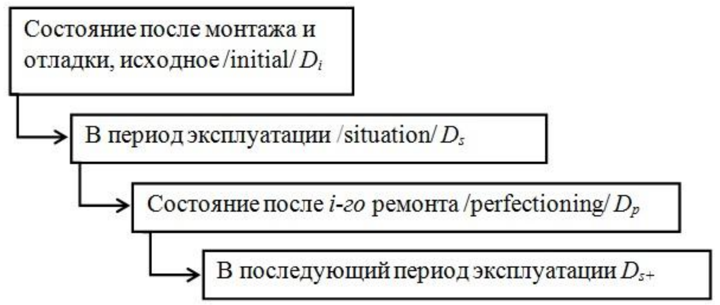


Рис. 1. Стадии представления цифровых образов станка

Согласно обозначениям рис. 1 и с учетом последовательности преобразований, упорядоченное множество цифровых моделей состояния станка в жизненном цикле имеет вид:

$$D_m = (D_i, D_s, D_p, D_{s+}).$$

В соответствии с типовыми правилами и методами испытаний работы по созданию D_i включают формирование базы начальных данных оценки качественного состояния станка. К ним относятся: показатели точности работы, характеристики динамики, тепловые деформации, оценки показателей надежности. База данных (БД) начального состояния станка составляет основу темпорального ЦО станка, построенного на принципах e-Mind Machine (e-MM) [10, 11].

Если речь идет об эксплуатируемом станке, учитывается его состояние при обработке типовых тестовых деталей или на тестовых режимах, регламентированных техническими требованиями и программой испытаний. Структура ЦО станка в процессах эксплуатации (D_s) с учетом e-MM, представлена на рис. 2.

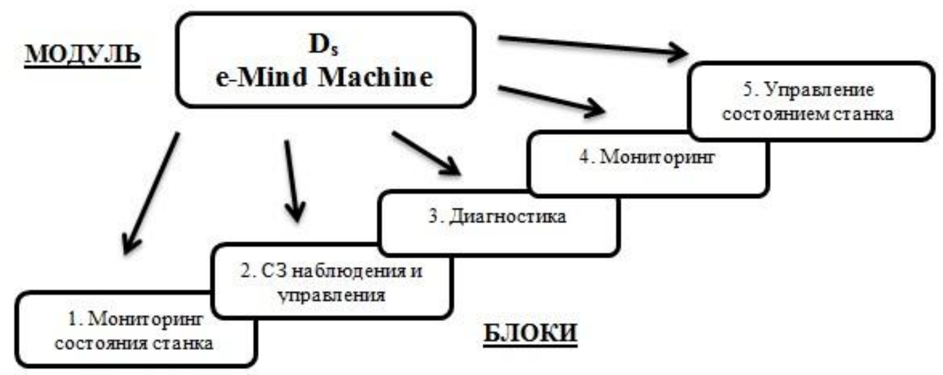


Рис. 2. Структура динамического ЦО станка на стадии обслуживания (D_s)

Специфика состояния ЦО определяется чередованием процессов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Интеллектуальность ЦО зависит от системы знаний (СЗ), расположенной в блоках темпорального ЦО станка.

В модулях управления техническим состоянием станка синтезируются решения на основе вложенных экспертных систем (ЭС) и информации, получаемой от узлов диагностики и мониторинга. В них идентифицируются измеряемые параметры станка, технологического процесса и его результата, что дает возможность диагностировать и оценивать состояния процессов и устройств. При этом выполняется ситуативная оценка состояния системы, необходимая для управления, адекватного сложившейся ситуации, и прогнозируются результаты. На основе принятых решений формируются управляющие действия, соответствующие назначениям блоков. Учитывая огромные объемы хранимых данных, во время работы системы возможно применение оптимизирующих методик анализа — например, онлайн-диагностики при помощи мел-частотных кепстральных коэффициентов [12].

При этом важно применять не количественные, а качественные оценки и понятия на базе нечетких процедур обработки, накопления и использования знаний и метазнаний. Целесообразно задействовать темпоральные ЭС. Во-первых, они работают в реальном масштабе времени. Во-вторых, в такие ЭС встроены алгоритмы обучения и адаптации, поэтому они способны улучшать функционирование подсистем станка.

При интеллектуальном управлении с использованием узлов СЗ в период эксплуатации станка полная информация о состоянии ЦО может быть представлена как упорядоченное множество (вектор) возможных состояний станочной системы и управления:

$$S = \left(S_w, S_i, S_v, S_z, S_u\right).$$

Здесь S_w, S_i, S_v, S_z, S_u — соответственно множества состояний процесса обработки, инструмента, технического состояния узлов станка, состояния продукта (заготовка — деталь) и управления. Множество допустимых векторов S назовем допустимым множеством состояний ЦО и обозначим $\tilde{S}$. СЗ синтезирует множества упорядоченных во времени управляющих действий $U_p \in \tilde{U}$. Они обеспечивают преобразование вектора исходного состояния $S^* \in \tilde{S}$ ЦО из гипотетически выявленного допустимого множества состояний $\tilde{S}$ к заданному целевому состоянию $S_g \in \tilde{S}$. Этот поиск основывается на анализе знаний о функциональных возможностях конкретной станочной системы. Фактически СЗ должна реализовать отображение λ_S :

$$\lambda_S : \tilde{S} \times \tilde{S} \to \tilde{U} \mid U_p = \lambda_S\left(S^*, S_g\right),$$

которое из множества допустимых управлений $\tilde{U}$ находит такое управление $U_p \in \tilde{U}$, которое соответствует вектору исходного состояния $S^* \in \tilde{S}$ и заданному целевому состоянию $S_g \in \tilde{S}$. При этом управление $U_p \in \tilde{U}$ обеспечивает переход станка из состояния $S^* \in \tilde{S}$ в состояние $S_g \in \tilde{S}$. Аппарат управления $U_p \in \tilde{U}$ основывается на формализмах нечеткой алгебры и нечетких множеств. Такой подход позволяет сформулировать правдоподобную гипотезу об организации целесообразного поведения станочной системы. В этом случае отмечается последовательный переход из одного состояния в другое, и на каждом переходе формируется информация об изменениях в ЦО станка [15]:

$$S_{j-1} \xrightarrow{U_p} \left(S_j, I_j\right).$$

Здесь S_{j-1} — состояние ЦО в начале *j*-го перехода; S_j — состояние ЦО, достигнутое в результате выполнения *j*-го перехода; I_j — изменения, которые необходимо внести в описания состояния ЦО, достигнутого в результате выполнения *j*-го перехода; U_p — управление, обеспечившее переход из состояния S_{j-1} в состояние S_j.

Текущее состояние S_j, достигнутое в результате *j*-го перехода, определяется состоянием:

— продукта (заготовка — деталь) S_{zj},

— подсистем инструмента — S_{ij},

— объекта — S_{vj}.

То есть

$$S_{zj} = \left(S_{zj}, S_{ij}, S_{vj}\right).$$

Модели управления техническим состоянием, построенные на данной базе СЗ, представляют собой основу формирования цифровой системы автономного управления состоянием станков.

Разработчики и исследователи уделяют серьезное внимание автоматизированному поддержанию работоспособности машин, особенно в условиях компьютеризации производства и совершенствования информационного обеспечения [1].

Разрабатываемые системы цифровизации обслуживания технологических машин предполагают использование интегрированных и (или) удаленных программных и аппаратных компонентов поддержки. Эти системы создаются для решения следующих задач:

— получение информации о состоянии оборудования в режиме реального времени,
— прогнозирование развития состояния различных устройств/узлов (У/У),
— оповещение персонала об аварийных и иных опасных состояниях оборудования,
— самостоятельное выполнение работ по поддержанию работоспособности и устранению неисправностей,
— проведение доработки или корректировки управляющих программ в процессе работы оборудования.

В рамках концепции e-MM создано автоматизированное автономное управление техническим состоянием станков (АУТС) [16]. Под АУТС понимается самостоятельное автоматизированное управление. Специальные средства и информационные связи позволяют ему оценивать состояние и роль станка. Исходя из этих оценок, АУТС подает определенные сигналы или воздействует на определенное устройство станка для поддержания или восстановления его работоспособности.

Ниже перечислены особенности АУТС.

Во-первых, система должна быть оборудована достаточным количеством датчиков, транслирующих достоверную информацию о состоянии узлов и устройств.

Во-вторых, при распознавании полученных данных необходимо исключить шумы и выделить параметры, информативно описывающие состояние оборудования.

В-третьих, системы прогнозирования должны гибко корректировать показатели в реальном времени, ориентируясь на информацию, полученную из блока диагностики.

В-четвертых, принятое решение должно предусматривать возможность уменьшения риска поломки оборудования или снижения износа его узлов, а также соответствовать выбранной программе обработки с минимальным отклонением от оптимального технологического процесса.

С учетом вышесказанного разработаны структура системы и функции автономного управления техническим состоянием станков [15]. Алгоритм работы системы мониторинга состояний представлен на рис. 3.

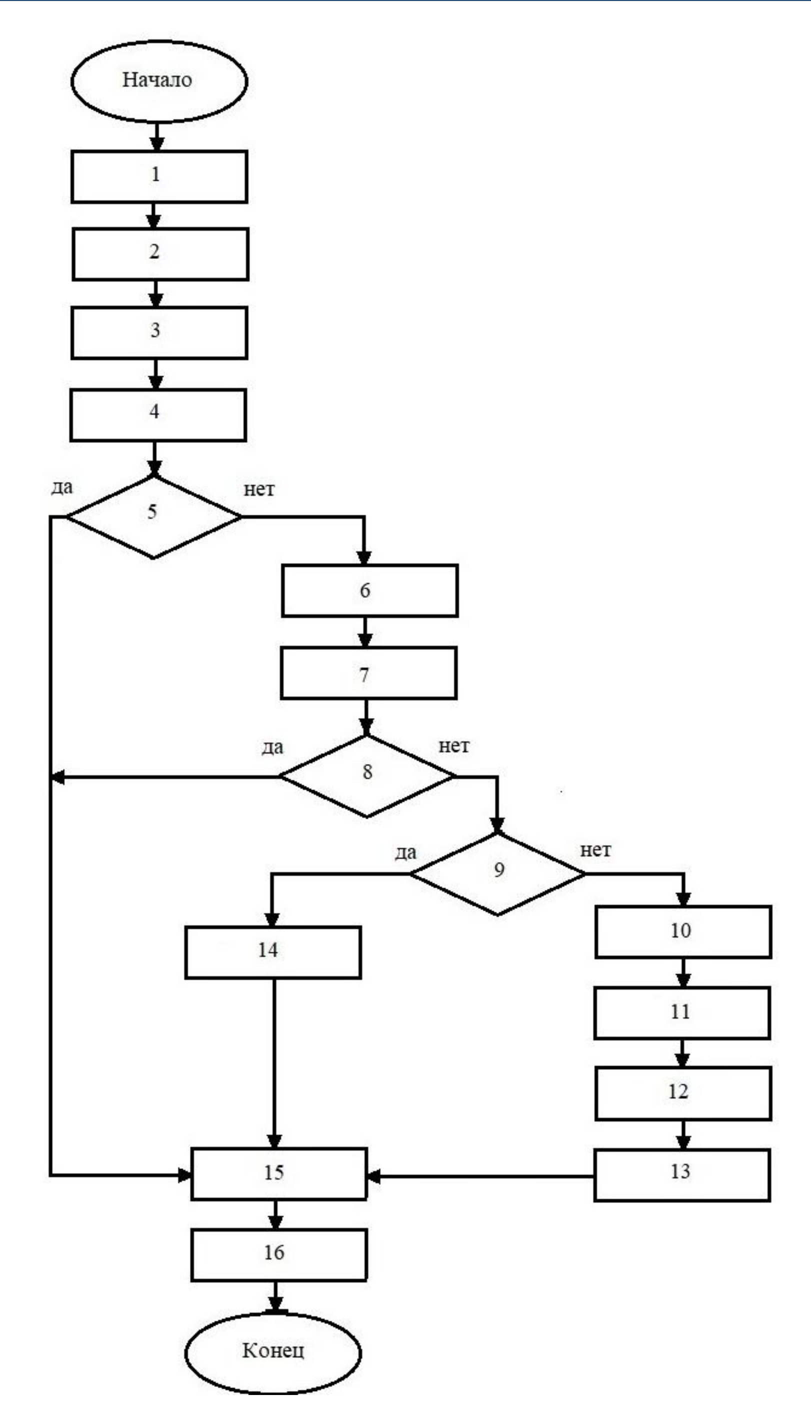


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы системы мониторинга состояний АУТС

Алгоритм предусматривает следующие действия.

1. Поиск в системе знаний сведений о наследуемых состояниях (т. е. на предшествующем этапе — n – 1) У/У и занесение в БД блока мониторинга состояний этапа n.

2. Получение текущих оперативных данных диагностики состояний У/У на этапе n.

3. Создание (изменение) текущего образа состояний У/У в рабочей памяти системы знаний этапа n – $СЗ_n$ блока мониторинга состояний станка.

4. Определение ЭС, принадлежащей СЗ блока мониторинга, тенденций изменения состояний У/У.

5. Сопоставление полученных оценок состояний с параметрами нечетких границ состояний работоспособности У/У, извлекаемыми из БД.

6. Прогнозируемая оценка сохранения допустимых параметров состояний в пределах работоспособности У/У при условии работы по введенной управляющей программе устройства ЧПУ.

7. Оценка достижимости сохранения работоспособности при условии коррекции элементов программы обработки.

8. Принятие решения о достижимости сохранения работоспособности.

9. Принятие решений по управлению техническим состоянием.
10. Коррекция состояний У/У без прерывания обработки.
11. Остановка обработки детали для коррекции (исправления) состояния.
12. Выбор автономных средств для предупреждения (устранения) неисправности У/У или внешних служб.
13. Проведение автономных работ по обслуживанию.
14. Обращение во внешние службы для устранения неисправностей технического состояния.
15. Диагностика и оценка состояний У/У после проведения обслуживания.
16. Протоколирование и ввод в СЗ перечня проведенных работ и результирующих оценок состояний У/У. Накопление опыта оценки технического состояния и автономного управления состоянием в СЗ.

В данном случае принятие решений и автономное управление действиями по поддержанию работоспособности выполнено на базе представленного подхода к цифровизации станков — и это главная отличительная особенность блока мониторинга состояния объекта и алгоритма работы мониторинга состояний АУТС.

Заключение. Предложено построение цифровых образов станка в соответствии с основными стадиями его жизненного цикла. Рассмотрен вопрос автоматизированной поддержки работоспособности станков на базе цифровизации путем создания автономных систем управления техническим состоянием. Указанные системы передают информацию о состоянии оборудования в реальном времени, целенаправленно сигнализируют о состоянии оборудования и поддерживают (восстанавливают) его работоспособность.

Библиографический список

1. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. — Москва : Эксмо, 2016. — 138 с. — (Top Business Awards).
2. Тугенгольд, А. К. Система знаний в виде интеллектуальной электронной технической документации для многооперационных станков / А. К. Тугенгольд, А. Ф. Лысенко, Д. А. Статовой // Вестник машиностроения. — 2015. — № 11. — С. 14–17.
3. Kemerait, R. C. New cepstral approach for prognostic maintenance of cycle machinery / R. C. Kemerait // Proceedings of the IEEE Southeast Conference in Tampa. — 1987. — P. 256–262.
4. Fisher, C. Multi-sensor condition monitoring systems for gas turbines / C. Fisher, N. C. Baines // Journal of Condition Monitoring. — 1988. — № 1. — P. 57–68.
5. Тугенгольд, А. К. Мониторинг состояния многооперационных станков на базе концепции e-MindMachine / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, С. В. Ющенко // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 77–86.
6. Тугенгольд, А. К. Гибкий мониторинг мехатронных технологических машин / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2016. — № 4. — С. 51–58.
7. Shaft coupling model-based prognostics enhanced by vibration diagnostics / C. S. Byington [et al.] // Insight. — 2009. — Vol. 51. — P. 420–425. — (Non-Destructive Testing and Condition Monitoring).
8. Tan, C. K. A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears / C. K. Tan, P. Irving, D. Mba // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2007. — № 21. — P. 208–233.
9. Мониторинг состояния станков и станочных систем / А. К. Тугенгольд [и др.] // СТИН. — 2017. — № 3. — С. 11–17.
10. Monitoring and Control of Tools in Multifunctional Machine Tools / A. K. Tugengol'd [et al.] // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, № 5. — P. 440–446.
11. Monitoring of Machine Tools / A. K. Tugengol'd [et al.] // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, № 8. — P. 440–446.
12. Тугенгольд, А. К. Принципы концептуального подхода к созданию подсистемы «ИНСТРУМЕНТ» в смарт-паспорте многооперационного станка / А. К. Тугенгольд, А. И. Изюмов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2. — С. 74–83.
13. Тугенгольд, А. К. Smart-Passport открытой мехатронной технологической системы. Контент / А. К. Тугенгольд. — Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2013. — 83 с.
14. Цифровой двойник (Digital Twin) [Электронный ресурс] / КАДФЕМ Си-Ай-Эс. — Режим доступа: https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/systems/digital-twin/ (дата обращения: 01.02.18.).
15. Управление техническим состоянием станков / А. К. Тугенгольд [и др.] // СТИН. — 2018. — № 7. — С. 8–15.

16. Тугенгольд, А. К. Smart-паспорт мехатронного технологического объекта. Концепт / А. К. Тугенгольд, А. А. Бердичевский // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2012. — № 7. — С. 33–41.

Поступила в редакцию 16.11.2018
Сдана в редакцию 18.11.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 16.11.2018
Submitted 18.11.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторах:

Тугенгольд Андрей Кириллович,
профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0551-1486
akt0@yandex.ru

Волошин Роман Николаевич,
аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника», Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907
r.voloshin2909@gmail.com

Юсупов Александр Рашидович,
магистрант кафедры «Робототехника и мехатроника», Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2179-616X
sthedgehog@icloud.com

Круглова Татьяна Николаевна,
докторант кафедры "Автоматизация и роботизация агропромышленного комплекса и биосистемный инжиринг, Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (РФ, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2730-0498
kruglovatanya@rambler.ru

Authors:

Tugengold, Andrey K.,
professor of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0551-1486
akt0@yandex.ru

Voloshin, Roman N.,
postgraduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6147-2907
r.voloshin2909@gmail.com

Yususpov, Alexander R.,
graduate student of the Robotics and Mechatronics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2179-616X
sthedgehog@icloud.com

Kruglova, Tatyana N.
postdoctoral student of the Automation and Robotization of Agroindustrial Complex and Biosystems Engineering Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (132, ul. Prosveshcheniya, Novocherkassk, Rostov Region, 346428, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2730-0498
kruglovatanya@rambler.ru

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 81–85. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 1, pp. 81–85. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.87 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-81-85

К вопросу эффективности методов и алгоритмов решения оптимизационных задач с учетом специфики целевой функции*

Е. Н. Остроух[1], Ю. О. Чернышев[2], Л. Н. Евич[3], П. А. Панасенко[4]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[4] Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко, г. Краснодар, Российская Федерация

On efficiency of methods and algorithms for solving optimization problems considering objective function specifics***

E. N. Ostroukh[1], Yu. O. Chernyshev[2], L. N. Evich[3], P. A. Panasenko[4]**
[1,2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[4]Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S. M. Shtemenko, Krasnodar, Russian Federation

Введение. Статья посвящена оценке эффективности методов и алгоритмов решения оптимизационных задач с векторным критерием и системой нелинейных ограничений. Описан подход, позволяющий после проведения эквивалентных преобразований перейти к оптимизационной задаче с одной целевой функцией (т. е. к задаче безусловной оптимизации). Однако полученная таким способом целевая функция обладает свойствами (нелинейность, мультимодальность, овражность, большая размерность), не позволяющими использовать для ее решения классические методы.
Цель представленного исследования — разработать для решения данной задачи гибридные методы, основанные на комбинациях алгоритмов, инспирированных живой природой, с другими подходами (гравитационным и градиентным).
Материалы и методы. Созданы новые методы для решения указанной задачи. Проведен компьютерный эксперимент на ряде тестовых функций, выполнен его анализ, показывающий эффективность различных комбинаций на различных функциях.
Результаты исследования. Оценена эффективность гибридных алгоритмов, которые комбинируют следующие подходы: генетический с иммунным; методы роевого интеллекта с генетическими и иммунными; иммунные и роевые с гравитационным и градиентным.
Обсуждение и заключение. Изучены возможности гибридных алгоритмов в оптимизационных задачах. В частности, на их основе могут приниматься решения при управлении сложными объектами в военной и промышленной сферах, при создании инновационных проектов, связанных с цифровой экономикой. Установлено, что вид целевой функции влияет на результат гораздо более существенно, чем комбинация алгоритмов.

Introduction. The estimation of efficiency of methods and algorithms for solving optimization problems with a vector criterion and a set of nonlinear constraints is considered. The approach that allows proceeding to an optimization problem with a single objective function (i.e., an unconditional optimization problem) after equivalent transformations is described. However, the objective function obtained in this way has properties (nonlinearity, multimodality, ravine, high dimension) that do not allow classical methods to be used to solve it. The presented work objective is to develop hybrid methods, based on combinations of the algorithms inspired by wildlife with other approaches (gravitational and gradient) for the solution to this problem.
Materials and Methods. New methods to solve the specified problem are developed. A computer experiment was conducted on a number of test functions; its analysis was performed, showing the efficiency of various combinations on various functions.
Research Results. The efficiency of hybrid algorithms that combine the following approaches is evaluated: genetic and immune; methods of swarm intelligence and genetic and immune; immune and swarm with gravity and gradient.
Discussion and Conclusions. The hybrid algorithms in optimization problems are studied. In particular, decisions can be made on their basis under the management of compound objects in the military and industrial sectors, in the creation of innovative projects related to the digital economy. It is established that the type of the objective function affects the result much more than the combination of algorithms.



*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: 16-01-00391, 16-01-00390, 18-01-00314.
**E-mail: Eostr@Donpac.Ru, Myvnn@list.ru, Bkln@mail.ru, we_panasenko_777@mail.ru
*** The research was supported by the RFFI grants nos. 16-01-00391, 16-01-00390, 18-01-00314.

Ключевые слова: комбинация, гибрид, биоинспирированный алгоритм, роевой интеллект, градиентный алгоритм, гравитационный алгоритм, эффективность, сходимость.

Keywords: combination, hybrid, bio-inspired algorithm, swarm intelligence, gradient-based algorithm, gravity search algorithm, efficiency, convergence.

Образец для цитирования: К вопросу эффективности методов и алгоритмов решения оптимизационных задач с учетом специфики целевой функции / Е. Н. Остроух [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 81–85. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-81-85

For citation: E.N. Ostroukh, et al. On efficiency of methods and algorithms for solving optimization problems considering objective function specifics. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. С. 81–85. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-81-85

Введение. В общем виде оптимизационная задача является многокритериальной с рядом ограничений в виде равенств и неравенств. Для решения многокритериальной задачи используются следующие типы алгоритмов:
— апостериорные (алгоритмы последовательных уступок);
— априорные;
— зондирования;
— адаптивные;
— аппроксимационные на основе оценки точности границы Парето.

Перечисленные подходы дают возможность сузить исходное множество допустимых решений до одной или нескольких точек [1, 2].

Выделим особенности названных выше методов. Использование апостериорных, априорных и адаптивных алгоритмов приводит исходную задачу с векторным критерием к задаче с одной целевой функцией, которую можно решать с помощью биоинспирированных алгоритмов или их комбинаций. Метод зондирования требует больших затрат вычислительных ресурсов. Высокой эффективностью характеризуется аппроксимационный подход, что обусловлено возможностью распараллеливания вычислительного процесса [2].

Решение задачи безусловной оптимизации основывается на одном из двух алгоритмов: штрафных функций и (или) скользящего допуска. Оба эти подхода хорошо представлены в [2] и [3]. Задача сводится к нахождению глобального оптимума функции без ограничений.

Отметим особенности целевой функции, при помощи которой описывается большой класс технических и экономических задач. Целевая функция часто бывает нелинейной, в большинстве случаев она не дифференцируема, не является унимодальной, обладает сложной топологией области допустимых значений. Поэтому для нахождения глобального оптимума представленной задачи авторы данной работы создали гибридные алгоритмы. При этом в парах могут комбинироваться:
— два биоинспирированных алгоритма;
— биоинспирированный и классический;
— биоинспирированный и основанный на физических законах.

Так, в работе [4] предложен гибрид на основе рядов Фурье и алгоритма светлячков. В работе [5] комбинируются градиентный и иммунный алгоритмы, а в работе [6] — роевой и гравитационный. Рассматривалась также комбинация генетического и роевого подходов [7, 8, 9] для решения различных оптимизационных задач с целевой функцией (в том числе задач обучения нейронных сетей различной топологии).

Критерием эффективности биоинспирированного алгоритма следует считать количество итераций (шагов), при котором:
— алгоритм находит достаточно близкий к оптимуму результат,
— количество шагов (время) является приемлемым,
— обеспечивается необходимая точность алгоритма.

Материалы и методы. Разработанные авторами комбинации биоинспирированных алгоритмов [4–10] протестированы на функциях Розенброка, Растригина, Гривонка и Швефеля [2]. При этом следует заметить, что комбинации усиливали достоинства каждого алгоритма пары и нивелировали их недостатки. Для каждой функции гибрид демонстрировал лучшие быстродействие и точность по сравнению с отдельными алгоритмами. Однако гибриды, выдавшие самый эффективный результат на одной тестовой функции, существенно слабее работают с другими тестовыми функциями. Это наблюдение позволяет сделать следующий вывод: эффективность биоинспирированных алгоритмов и их комбинаций с другими алгоритмами значительно сильнее зависит от

целевой функции, чем от особенностей комбинации алгоритмов. Такой же вывод можно сделать из теоремы NFL (сокращение от «no free lunch» — «бесплатных завтраков не бывает») [11].

Рассмотрим задачу: необходимо найти глобальный оптимум некоторой функции, обладающей свойствами, описанными выше. Имеется банк биоинспирированных алгоритмов и (или) их комбинаций. Есть банк задач с целевой функцией, не обладающей свойством унимодальности, с большим количеством переменных и параметров. Какой алгоритм может максимально эффективно решить оптимизационную задачу для данной функции? Для каких типов функций этот алгоритм покажет наилучший результат, а для каких его применять нецелесообразно? Очевидно, что создать такой алгоритм невозможно. Алгоритмы могут показывать хорошие результаты на одной функции и быть совершенно неприемлемыми для других функций.

В отношении структуры биоинспирированных алгоритмов необходимо заметить: большое число используемых ими эмпирических параметров не позволяет заранее провести теоретическую оценку эффективности таких алгоритмов и их комбинаций. (Противоположный пример — детерминированные алгоритмы, которые с успехом решают задачи с линейными, квадратичными, строго выпуклыми, унимодальными функциями.)

Для альтернативных оценок биоинспирированных алгоритмов используют общедоступные библиотеки с тестовыми задачами, которые позволяют сравнивать известные и новые алгоритмы и их комбинации [11, 12]. Одно из крупнейших собраний тестовых задач — библиотека института математики им. С. Л. Соболева [12]. В ней представлены различные подходы к решению сложных NP-полных задач оптимизации с учетом оценок вычислительной сложности. Среди других библиотек можно отметить узко профилированные: библиотека с открытым кодом для генетических алгоритмов GAlib [13]; библиотеки для построения эволюционных алгоритмов EAlib [14], Perl [15] и фреймворков в Java [16].

Результаты исследования. Выполненное авторами изучение особенностей генетических и популяционных алгоритмов позволяет выделить следующие их достоинства и недостатки.

Генетические алгоритмы (ГА) построены на основе идентичности принципов поведения биологических и технических систем. ГА используют принцип выбора наилучших решений из популяции имеющихся, что позволяет находить оптимальное решение задачи. Данные алгоритмы дают хорошую диверсификацию, поскольку параллельно обрабатывается информация множества подходящих точек, в которых оптимум находится на основе использования целевой функции, а не ее различных приращений.

Муравьиные алгоритмы имитируют принципы жизнедеятельности муравьиной колонии. В них принцип автономного функционирования каждого агента сочетается с деятельностью колонии в целом, что позволяет решать достаточно сложные оптимизационные задачи. Комбинация муравьиных алгоритмов с алгоритмами локального поиска позволяет быстро находить начальные точки поиска оптимума. Такие алгоритмы дают наилучшие результаты для задач большой размерности. По эффективности они весьма близки к проблемно ориентированным и метаэвристическим алгоритмам. Данный подход показал хорошие результаты в решении различных практических задач, например, коммивояжера, оптимального проектирования радиоэлектронной аппаратуры и др. Благодаря возможности использования настраиваемых параметров, муравьиные алгоритмы применяются в решении распределительных и транспортных задач.

Следует отметить положительные особенности муравьиных алгоритмов:

— для некоторых задач они дают более эффективное решение, чем генетические или алгоритмы, основанные на нейронных сетях;

— использование в муравьиных алгоритмах памяти обо всей колонии более эффективно, чем использование в генетическом алгоритме информации только о предыдущем поколении;

— случайный выбор пути в муравьином алгоритме позволяет исключить неоптимальные начальные решения;

— выбор параметров, отвечающих за изменение оптимизационного шага, позволяет успешно использовать данный алгоритм в динамических приложениях.

К недостаткам муравьиных алгоритмов можно отнести следующие:

— теоретический анализ затруднен в результате последовательности случайных решений, что обусловлено изменениями распределений вероятностей при итерациях;

— время сходимости алгоритма не может быть заранее определено, и для решения этой проблемы муравьиный алгоритм дополняется методами локального поиска;

— свободные параметры для настройки работы при решении конкретной задачи определяются только экспериментальным путем.

При нахождении экстремумов для сложных многомерных немонотонных функций алгоритмы пчелиного роя с равной вероятно на любой итерации определяют оптимальный элемент (элемент с заданными свойствами). Эти алгоритмы эффективно используются для оптимизации немонотонных функций в NP-полных за-

дачах, в том числе распределительных и транспортных. Они ищут единственный оптимальный элемент, определяющий экстремум (или множества таких элементов). Пчелиный алгоритм параллельно реализует поиск в окрестности лучших и выбранных участков. При этом ему не свойственны некоторые недостатки эволюционных методов — например, он не требует значительного объема памяти для хранения популяции решений.

Обсуждение и заключение. Анализ известных гибридных алгоритмов показал следующее. Одна комбинация может дать хороший результат на какой-либо тестовой функции (например, Розенброка), но на другой функции этот гибрид по эффективности будет значительно уступать другим комбинациям. Таким образом, можно утверждать, что вид целевой функции влияет на результат гораздо более существенно, чем комбинация алгоритмов. Следовательно, изучение вида и типа целевой функции позволяет подобрать оптимальный вариант комбинации.

Библиографический список

1. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. — Москва : Физматлит, 2007. — 255 с.

2. Карпенко, А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А. П. Карпенко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 446 с.

3. Агибалов, О. И. Условная и безусловная оптимизация при решении биоинспирированными алгоритмами / О. И. Агибалов, А. А. Золотарев, Е. Н. Остроух // Интеллектуальные технологии и проблемы математического моделирования : мат-лы всерос. конф. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2018. — С. 21–22.

4. Остроух, Е. Н. Решение задач бизнес-прогнозирования на основе рядов Фурье и алгоритма светлячков / Е. Н. Остроух, Д. Н. Климова, С. Маркин // Системный анализ, управление и обработка информации : тр. VIII междунар. семинара. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 153–158.

5. Агибалов, О. И. Оптимизация многомерных задач на основе комбинирования детерминированных и стохастических алгоритмов / О. И. Агибалов // Современные наукоемкие технологии. — 2017. — № 9. — С. 7–11.

6. Остроух, Е. Н. Разработка гибридного алгоритма решения оптимизационных задач принятия решений и управления [Электронный ресурс] / Е. Н. Остроух, Л. Н. Евич, П. А. Панасенко // Искусственный интеллект: проблемы и пути их решения : мат-лы конф. — Москва, 2018. — С. 165–168. — Режим доступа: https://docplayer.ru/74455293-Programma-konferencii-iskusstvennyy-intellekt-problemy-i-puti-resheniya-2018.html (дата обращения 08.02.19).

7. Евич, Л. Н. Разработка гибридного алгоритма решения оптимизационной задачи с нелинейной целевой функцией / Л. Н. Евич, Е. Н. Остроух, П. А. Панасенко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2018. — № 1 (1). — С. 61–65.

8. Evich, L.N., Ostroukh, E.N., Panasenko, P.A. Metody resheniya zadach optimizatsii s mul'timodal'noy tselevoy funktsiey na osnove gibridnykh algoritmov.[Development of hybrid algorithm for solution of optimization problem with nonlinear target function.] Prom-Inzhiniring (ICIE-2018): tr. IV mezhdunar. nauch.-tekhn. ko [Prom-Engineering (ICIE-2018): Proc. IV Int. Sci.-Tech. Conf.] Moscow, 2018, no. 1-1 (67), pp. 61-65 (in Russian).

9. Исследование комбинированного алгоритма при обучении трехслойных нейронных сетей различной топологии / Е. Н. Остроух [и др.] // Программные продукты и системы. — 2018. — Т. 31, № 4. — С. 673–676.

10. Wolpert, D. H. The no free lunch Theorems for optimization / D. H. Wolpert, W. G. Macready // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 1997. — Vol. 1, № 1. — P. 67–82.

11. Родзин, С. И. Алгоритмы биостохастической оптимизации: достижения, проблемы теории, трудоемкость / С. И. Родзин // IS&IT'18 : тр. конгресса по интеллект. системам и информ. технологиям. — Таганрог : Изд-во Ступина С. А., 2018. — Т. 2. — С. 141–158.

12. Discrete Location Prodlems. Benchmark library [Электронный ресурс] / Sobolev Institute of Mathematics ; Russian Foundation for Basic Research. — Режим доступа: http://www.math.nsc.ru/AP/benchmarks/index.html (дата обращения: 11.05.18).

13. Wall, M. GAlib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components [Электронный ресурс] / M. Wall ; Massachusetts Institute of Technology. — Режим доступа: http://lancet.mit.edu/ga/ (дата обращения: 08.11.18).

14. EALib: An Evolutionary Algorithms Library [Электронный ресурс] / GitHub Inc. — Режим доступа: http://github.com/dknoester/ealib/ (дата обращения: 08.11.18).

15. Merelo, J. J. Library for doing evolutionary computation in Perl [Электронный ресурс] / J. J. Merelo. — Режим доступа: http://cpeal.sourceforge.net/ (дата обращения: 08.11.18).

16. Dyer, D. W. Watchmaker Framework for Evolutionary Computation [Электронный ресурс] / D. W. Dyer. — Режим доступа: http://watchmaker.uncommons.org (дата обращения: 08.11.18).

Поступила в редакцию 02.11.2018
Сдана в редакцию 02.11.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 02.11 .2018
Submitted 02.11.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторах:

Остроух Евгений Николаевич,
доцент кафедры «Информационные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1384-0469,
eostr@donpac.ru

Евич Людмила Николаевна,
доцент кафедры «Массовые коммуникации и мультимедийные технологии» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7886-0954,
evichlng@gmail.com

Чернышев Юрий Олегович,
профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4901-1101
myvnn@list.ru

Панасенко Павел Александрович,
старший помощник начальника отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров Краснодарского высшего военного училища им. генерала армии С. М. Штеменко (РФ, 350063, г. Краснодар, ул. Красина, 4), кандидат технических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1264-1481
we_panacenko_777@mail.ru

Authors:

Ostroukh, Evgeny N.,
associate professor of the Information Technologies Department, Don State Technical University, (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1384-0469,
eostr@donpac.ru

Evich, Lyudmila N.,
associate professor of the Mass Communications and Multimedia Technologies Department, Don State Technical University, (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Phys -Math.), associate professor,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-7886-0954,
evichlng@gmail.com

Chernyshev, Yury O.,
professor of the Production Automation Department, Don State Technical University, (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-4901-1101
myvnn@list.ru

Panasenko, Pavel A.,
senior assistant of Head of the Department of Organizing Scientific Research and Training of Academic and Teaching Staff, Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S. M. Shtemenko (4, ul. Krasina, Krasnodar, 350063, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1264-1481
we_panacenko_777@mail.ru

Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 1. С. 86–92. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 1, pp. 86–92. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.683.4 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-86-92

Оптимизация арифметического кодера для сжатия изображений, полученных при дистанционном зондировании водных объектов*

Р. В. Арзуманян[1**]
[1] Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация

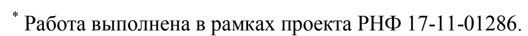
Arithmetic coder optimization for compressing images obtained through remote probing of water bodies ***

R. V. Arzumanyan[1**]
[1] Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

Введение. Предложенный в статье быстрый программный алгоритм арифметического кодирования предназначен для сжатия цифровых изображений. Показано, каким образом сложность алгоритма арифметического кодера зависит от критериев сложности (при этом размер входа не учитывается). В процессе работы определены наиболее вычислительно сложные части алгоритма арифметического кодера. Выполнена оптимизация производительности их программной реализации.
Кодеки с новым алгоритмом сжимают без учета межкадровой разницы фото- и видеоматериалы, полученные при дистанционном зондировании водных объектов.
Материалы и методы. В представленной научной работе использована подборка спутниковых снимков акватории Азовского моря. При этом оптимизирован программный алгоритм арифметического кодера, проведено теоретическое исследование, выполнен вычислительный эксперимент.
Результаты исследования. Увеличена производительность программной реализации арифметического кодера на примере видеокодека VP9. Для измерения времени выполнения произведены многочисленные запуски эталонного и модифицированного кодеков. Сравнение среднего времени их исполнения показало, что производительность модифицированного кодека на 5,21 % выше. Прирост общей производительности для арифметического декодирования составил 7,33 %.
Обсуждение и заключения. Увеличение скорости работы новейших алгоритмов сжатия цифровых фото- и видеоизображений позволяет применять их на мобильных вычислительных платформах, в том числе в составе бортовой электроники беспилотных летательных аппаратов. Теоретические результаты данной работы расширяют методы анализа сложности алгоритма в среднем случае. Они могут использоваться в ситуации, когда количество шагов алгоритма зависит не только от размеров входа, но и от неизмеримых критериев (например, от схемы обращения к общей оперативной памяти со стороны параллельных процессоров).

Introduction. The fast program algorithm of arithmetic coding proposed in the paper is for the compression of digital images. It is shown how the complexity of the arithmetic coder algorithm depends on the complexity measures (the input size is not considered). In the course of work, the most computationally complex parts of the arithmetic coder algorithm are determined. Performance optimization of their software implementation is carried out. Codecs with the new algorithm compress photo and video records obtained through the remote probing of water bodies without frame-to-frame difference.
Materials and Methods. In the presented paper, a selection of satellite images of the Azov Sea area was used. At this, the software algorithm of the arithmetic coder was optimized; a theoretical study was conducted; and a computational experiment was performed.
Research Results. The performance of the software implementation of the arithmetic coder is increased by the example of the VP9 video codec. Numerous launches of reference and modified codecs were made to measure the runtime. Comparison of the average time of their execution showed that the modified codec performance is 5.21% higher. The overall performance improvement for arithmetic decoding was 7.33%.
Discussion and Conclusions. Increase in the speed of the latest digital photo and video image compression algorithms allows them to be used on mobile computing platforms, also as part of the onboard electronics of unmanned aerial vehicles. The theoretical results of this work extend tools of the average-case complexity analysis of the algorithm. They can be used in case where the number of algorithm steps depends not only on the input size, but also on non-measurable criteria (for example, on the common RAM access scheme from parallel processors).





* Работа выполнена в рамках проекта РНФ 17-11-01286.
** E-mail: roman.arzum@gmail.com
*** The research is done within the frame of RSF project no. 17-11-01286.

Ключевые слова: арифметическое кодирование,оптимизация производительности, сжатие изображений, сложность алгоритма в среднем, видеокодек.

Keywords: arithmetical coding, performance optimiza tion, image compression, average-case algorithm complexity, video codec.

***Образец для цитирования*:** Арзуманян, Р. В. Оптимизация арифметического кодера для сжатия изображений, полученных при дистанционном зондировании водных объектов / Р. В. Арзуманян // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 86–92. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-86-92

For citation: R.V. Arzumanyan. Arithmetic coder optimization for compressing images obtained through remote probing of water bodies. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 86–92. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-86-92

Введение. Мониторинг состояния акватории зачастую проводят с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), ведущих аэрофотосъемку в видимом и инфракрасном диапазонах. Технические возможности мобильной камеры, которой оснащен БПЛА, накладывают ряд ограничений на оборудование, обрабатывающее и хранящее снятый материал до возвращения БПЛА. В частности, необходимо учитывать перечисленные ниже факторы.

1. Энергоэффективность оборудования, которое кодирует отснятый материал, поскольку от этого напрямую зависит продолжительность автономной работы БПЛА.
2. Эффективность сжатия фото- и видеоданных во время полета. Изображения в высоком разрешении занимают значительный объем памяти программного обеспечения (ПО), и это ограничивает количество информации, которую может накопить БПЛА.

Практически вся аппаратура для фото- и видеосъемки аппаратно поддерживает наиболее распространенный кодек для сжатия изображений JPEG. Однако он уступает наиболее современным кодекам HEVC и VP9, которые не только поддерживают видеопоследовательности, но и позволяют лучше сжимать отдельные изображения. Так, GoogleVP9 демонстрирует аналогичное JPEG визуальное качество по метрике SSIM (структурная схожесть) и при этом сжимает изображения на 25–34 % сильнее [1]. В сравнении с тем же JPEG кодек HEVC позволяет улучшить степень сжатия на 10–44 % по метрике PSNR (пиковое соотношение сигнала к шуму) [2]. Однако следствием высокой степени сжатия при меньшем размере битового потока является большая вычислительная сложность кодеков HEVC и VP9 [3, 4]. Архитектура кодека JPEG в общем виде представлена на рис 1.

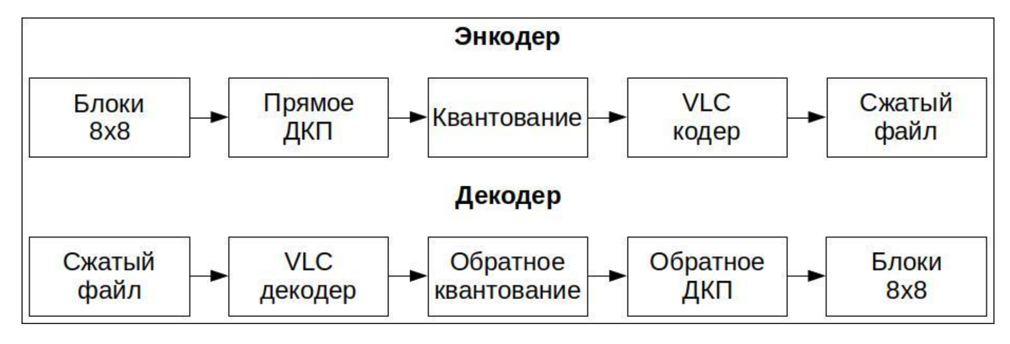


Рис. 1. Блок-схема работы кодека JPEG

Здесь под VLC понимается сжатие кодами переменной длины (variable length coding). Входной кадр разбивается на блоки фиксированного размера 8×8. Каждый из них подвергается прямому дискретному косинусному преобразованию (ДКП), квантизации коэффициентов преобразования и последующему энтропийному сжатию при помощи алгоритма Хаффмана [4]. Дискретное косинусное преобразование выполняется в целочисленном виде [5]. С момента принятия стандарта JPEG в 1992 году разработано множество быстрых алгоритмов, которые позволяют провести преобразование целиком в регистрах центрального процессора. Энтропийное сжатие Хаффмана также не является вычислительно сложной задачей, поэтому даже мобильные процессоры в программном режиме выполняют сжатие и декодирование изображений JPEG [6].

HEVC [6] и VP9 принципиально схожи и представляют собой гибридные блочные кодеки с разбиением кадра на блоки переменного размера, внутрикадровым предсказанием, дискретным преобразованием и последующей фильтрацией для устранения артефактов блочности. Блок-схема работы кодека HEVC представлена на рис. 2.

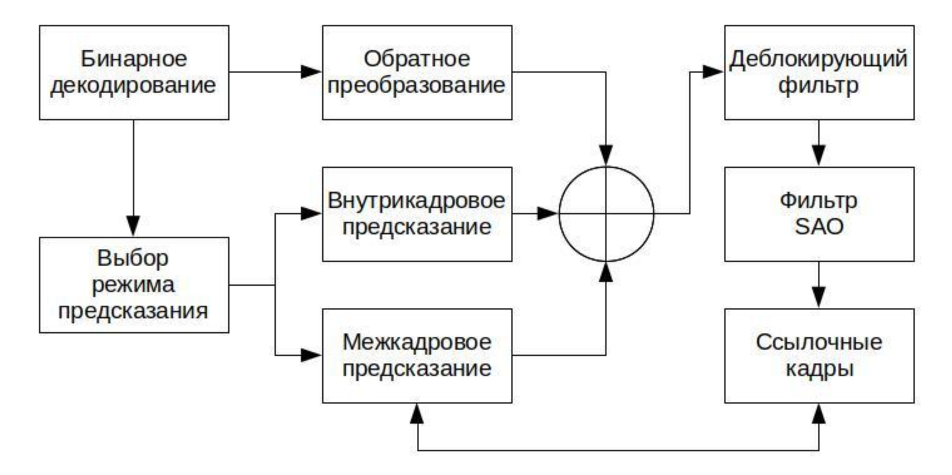


Рис. 2. Блок-схема кодека HEVC

Здесь аббревиатурой SAO обозначен фильтр с адаптивным смещением (sample adaptive offset). Помимо перечисленных алгоритмов реконструкции изображения в обоих кодеках применяется контекстно-адаптивное двоичное арифметическое энтропийное кодирование, значительно более сложное, чем сжатие Хаффмана. При высоком уровне визуального качества именно арифметическое кодирование занимает значительную часть общего времени работы декодера. В общем виде схема работы арифметического кодера представлена на рис. 3.

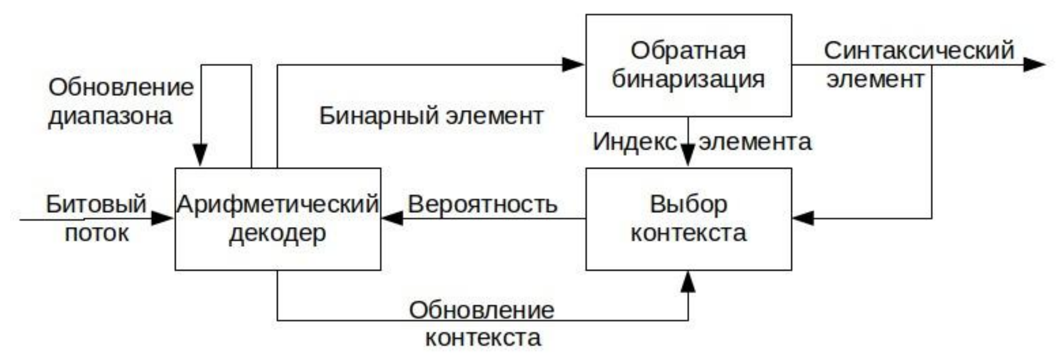


Рис. 3. Блок-схема арифметического кодера

Кодеки нового поколения предполагается использовать в том числе для сжатия изображений, полученных при дистанционном зондировании природных объектов. В этом случае необходимо оптимизировать работу гибридных блочных кодеков для обеспечения обработки фото- и видеоданных БПЛА в режиме реального времени. Необходимо уделить особое внимание оптимизации двоичного контекстно-адаптивного арифметического кодирования, ввиду его существенной вычислительной сложности.

Цель данного исследования — ускорить работу арифметического декодера на мобильных процессорах архитектуры ARM. Это позволит повысить быстродействие видеокодеков Google VP9 и применять их в бортовой электронике БПЛА для дистанционного зондирования водных объектов. Применение улучшенных инструментов компрессии фото и видео, полученных в результате аэрофотосъемки, позволяет увеличить объем сохраняемых данных, повысить их визуальное качество и разрешение.

Основная часть. К основным составляющим современного видеокодека относятся бинаризация синтаксических элементов битового потока и адаптивное бинарное кодирование этих элементов в битовый поток. Данная стадия не подлежит векторизации и распараллеливанию, но может быть оптимизирована путем статистического анализа входных данных. Основной способ прогнозирования времени работы программы — анализ сложности соответствующего алгоритма. Выделяют сложность в лучшем, худшем случае и сложность в среднем. $\sqsupset x$ — входные данные алгоритма A, по которым вычисляется выход алгоритма y. Функцию затрат алгоритма по времени обозначим $C_A^T(x)$, а функцию затрат по памяти — $C_A^S(x)$. Временной и пространственной сложностью A в худшем случае будем называть функции числового аргумента

$$T_A(n) = \max_{\|x\|=n} C_A^T(x),$$
$$S_A(n) = \max_{\|x\|=n} C_A^S(x).$$

Рассмотрим конечное множество входов размера n:

$$X_n = \{x: \|x\| = n\}.$$

$\forall x \in X_n$ соответствует вероятность:

$$P_n(x) \in [0,1]: \sum_{x \in X_n} P_n(x) = 1.$$

Сложностью в среднем называют математическое ожидание:

$$T_A = \sum_{x \in X_n} P_n(x) C_A^T(x),$$
$$S_A = \sum_{x \in X_n} P_n(x) C_A^S(x).$$

Описанный подход является классическим для анализа сложности алгоритма в среднем и подробно описан в [7, 8]. Отметим причины, по которым применение данного метода на практике может быть затруднено или нецелесообразно.

1. Разница между числом шагов алгоритма в теории и количеством тактов процессора, необходимым для выполнения шага на практике. Так, большинство современных центральных процессоров производят сложение и умножение за один такт, в то время как остаток от деления вычисляется за десятки тактов.

2. Аппаратные особенности системы памяти. В современных компьютерах применяется многоуровневая иерархия памяти. Ее компоненты работают на разных скоростях. Обращения к памяти занимают значительно больше времени, чем операции в регистрах.

3. Оптимизирующие компиляторы и аппаратные планировщики. При сборке исполняемых файлов оптимизирующие компиляторы значительно преобразовывают код, не меняя автомат состояний программы. Аппаратные планировщики центрального процессора изменяют порядок исполнения инструкций для большей производительности и предсказывают условные переходы, а контроллеры кэша производят чтение из памяти блоками.

4. В случае программной реализации алгоритмов на процессорах общего назначения программные компоненты взаимно влияют друг на друга. Например, планировщик задач разделяет процессорное время, и параллельные процессы, имеющие несколько потоков, могут выполняться на переменном числе ядер процессора.

Предлагаемая модификация метода анализа сложности алгоритма служит теоретическим дополнением для практических инструментов измерения производительности — таких, например, как профилирование и инструментация кода программы. Впервые метод разбиения входов алгоритма на классы сложности был представлен в [9]. Рассмотрим алгоритм A и множество всех возможных входных данных:

$$G: \{g_1, g_2 \dots\},$$

А также все возможные выборки из G, различные по размеру и составу:

$$g_i: \{g_i^1, g_i^2 \dots\}.$$

Множество критериев сложности реализации алгоритма (например, число циклов процессора, время исполнения и т. п.):

$$\propto_i : g_i \to \mathbb{R}.$$

Множество критериев сложности:

$$A: \{\propto_1, \propto_2 \dots\}.$$

Данное множество обладает перечисленными ниже свойствами.

1. $\forall \propto_1, \propto_2 \in A: \propto_1 \neq \propto_2$ — все элементы A различны.
2. $\forall \propto_i \in A$ разбивает G на множество классов эквивалентности по сложности

$$G(\alpha_i) = \{g_i^1 \cap \ g_i^2 \dots\}.$$

3. Все выборки из $G(\alpha_i)$ имеют одинаковую сложность:

$$\exists \ \alpha_i \in A, g_i^k \in G(\alpha_i), \alpha_i: g_i^k \to r_i, k \in [0, \|G(\alpha_i)\|], r_i \in \mathbb{R}.$$

Итак, все элементы A различны, поэтому их можно переупорядочить так, чтобы функция сложности от критерия была неубывающей на всем множестве критериев. Ожидаемая сложность схожа с оценками сложности алгоритма в среднем для дискретной и непрерывной вероятности сложности. Для дискретного случая:

$$R(A) = \sum_{\alpha_i \in A} r_i \, p_i,$$

для непрерывного случая:

$$R(A) = \int_A \ r \, dF(r).$$

Применим рассматриваемый метод для анализа сложности арифметического кодека. Процесс энтропийного сжатия [10, 11] можно разделить на составляющие части.

1. Бинаризация, или преобразование кодируемого символа (синтаксического элемента сжатого битового потока) в строку, состоящую из нулей и единиц (бинарную строку).

2. Моделирование контекста для сжатия синтаксических элементов в обычном режиме. Для синтаксических элементов, чье статистическое распределение близко к нормальному, данный этап не выполняется, и они кодируются в режиме обхода (bypass).

3. Арифметическое кодирование бинарной строки.

Рассмотрим более подробно схему арифметического декодирования кодека Google VP9, а именно ту часть, которая связана с субэкспоненциальным кодированием синтаксических элементов.

Представим алгоритм субэкспоненциального кодирования в общем виде [12]. На первом шаге вычисляются значения переменных:

$$b = \begin{cases} k: n < 2^k \\ \lfloor \log_2 n \rfloor : n \geq 2^k, \end{cases}$$

$$u = \begin{cases} 0: n < 2^k \\ b - k + 1: n \geq 2^k, \end{cases}$$

где k — параметрическое значение, для кодека Google VP9 оно равно 4.

На втором шаге унарный код $u(u+1)$ бит дополняется младшими битами n. Длина кода равна:

$$u + 1 + n = \begin{cases} k + 1: n < 2^k \\ 2\lfloor \log_2 n \rfloor - k + 2: n \geq 2^k. \end{cases}$$

Таким образом, декодирование литерала сводится к декодированию составляющих его бит в цикле. Для оптимизации производительности данного алгоритма важно знать распределение вероятности длин литералов. Литералы, занимающие в сжатом битовом потоке наибольшее количество бит (такие, как коэффициенты обратного преобразования и вектора движения), кодируются сериями, поэтому высока вероятность, что в сжатом битовом потоке распределение длин литералов будет вырожденным с многочисленными повторами элементов с одинаковым значением. Для проверки этой гипотезы собраны экспериментальные данные о распределении длин литералов на наборе спутниковых снимков акватории Азовского моря (табл. 1).

Таблица 1

Длина литерала, бит	1	2	3	4	5	6
Вероятность, %	0,94	0	67,35	18,25	0	13,46

Наиболее вероятными являются литералы длиной 3, 4 и 6 бит. Максимальная возможная длина литерала для данной последовательности составляет всего 6 бит. Этот факт важен для программной оптимизации функции субэкспоненциального декодирования литерала. В рамках оптимизации реального кодека нас в первую очередь интересует критерий времени исполнения. Для получения множества сложностей $R : \{r_0, \ldots, r_4\}$ будем профилировать производительность программы. Множество уникальных элементов R составит множество критериев сложности времени исполнения A. На основе полученных данных для оптимизации применены перечисленные ниже подходы.

1. Сохранение результатов вычисления длины литерала для декодирования серий литералов одинаковой длины.
2. Размотка цикла субэкспоненциального декодирования литерала.
3. Более эффективный алгоритм расчета числа бит в литерале.
4. Более эффективное использование регистров процессора непосредственно внутри функции арифметического декодирования.

Реализация пунктов 1 и 4 достаточно очевидна, поэтому рассмотрим более подробно пункты 2 и 3. Внутри функции субэкспоненциального декодирования происходит составление декодированного литерала по битам, декодированным из сжатого битового потока. В данном случае узким местом является цикл с переменным количеством итераций. Его можно заменить набором switch-case без конструкции break в конце. Данная техника известна как метод Даффа (Duff’s device). Она позволяет заменить несколько итераций цикла последовательным выполнением инструкций без необходимости условных переходов. Величина битового сдвига — константа, которую не нужно считывать из регистра — счетчика цикла.

Листинг 1: Оригинальная функция декодирования литерала

```
static int vp9_read_literal(vp9_reader *br, int bits)
{
int z = 0, bit;
 for (bit = bits – 1; bit >= 0; bit –)
   z |= vp9_read_bit(br) << bit;
return z;
}
```

Листинг 2: Модифицированная функция декодирования литерала

```
static int vp9_read_literal(vp9_reader *br, int bits) {
 register int z = 0;
 switch(bits -1){
   case 6: z |= vp9_read(br, 128) << 6;
   case 5: z |= vp9_read(br, 128) << 5;
   case 4: z |= vp9_read(br, 128) << 4;
   case 3: z |= vp9_read(br, 128) << 3;
   case 2: z |= vp9_read(br, 128) << 2;
   case 1: z |= vp9_read(br, 128) << 1;
   case 0: z |= vp9_read(br, 128);
break;
}
return z;
}
```

Еще одно узкое место — расчет числа бит литерала в цикле while [13]. Данное решение плохо тем, что число итераций цикла непредсказуемо. Вместо него был использован быстрый алгоритм подсчета бит [14, 15], который выполняет расчет за фиксированное число шагов без использования условных переходов.

Листинг 3: Быстрый подсчет числа бит в литерале

```
Unsig ned intv; // 32-битный аргумент
Register unsig ned intr; // переменная для числа бит
register unsigned int shift;
r = (v > 0xFFFF) << 4;
v >>= r;
shift = (v > 0xFF) << 3;
v >>= shift;
r |= shift;
shift = (v > 0xF) << 2;
v >>= shift;
r |= shift;
shift = (v > 0x3) << 1;
v >>= shift;
r |= shift;
r |= (v >> 1);
```

Для измерения времени выполнения произведены многочисленные запуски эталонного и модифицированного кодеков. При этом сравнивалось среднее время их исполнения. Выяснилось, что производительность модифицированного кодека на 5,21 % выше. Прирост общей производительности для арифметического декодирования составил 7,33 %.

Выводы. Проведена оптимизация работы арифметического кодера в составе видеокодека на примере стандарта Google VP9. Для решения поставленной задачи предложена модификация метода анализа сложности алгоритма в среднем. В основе данного подхода — разбиение множества входов на классы эквивалентности по сложности. Рассмотренный метод позволяет прогнозировать сложность алгоритма в среднем для тех случаев, когда количество шагов алгоритма и время его исполнения зависят от сложно измеримых параметров, что характерно для контекстно-адаптивного арифметического кодирования. Предложенный метод применен для оптимизации скорости работы арифметического двоичного кодера (на примере кодека Google VP9) применительно к задачам сжатия изображений, полученных при дистанционном зондировании водных объектов. Результаты работы позволяют применить передовые методы сжатия фото- и видеоданных, полученных при аэрофотосъемке водных объектов. Таким образом можно увеличить объем накапливаемых данных, повысить визуальное качество и разрешение отснятого материала на 25–34 % (по метрике визуального качества SSIM) и увеличить скорость работы арифметического кодера на 7 %.

Библиографический список

1. WebP Compression Study [Электронный ресурс] / Google Developers. — Режим доступа: https://developers. google.com/ speed/webp/docs/webp_study (дата обращения 01.02.19).

2. Nguyenand, T. Objective Performance Evaluation of the HEVC Main Still Picture Profile / T. Nguyenand, D. Marpe // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. — 2015. — Vol. 25, № 5. — P. 790–797.

3. Блейхут, Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Р. Блейхут. — Москва : Мир, 1989. — 448 с.

4. Wallace, G. K. The JPEG still picture compression standard / G. K. Wallace // IEEE Transactions on Consumer Electronics. — 1992. — Vol. 38, № 1. — P. XVIII–XXXIV.

5. Дворкович, А. В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / А. В. Дворкович, В. П. Дворкович. — Москва : Техносфера, 2012. — 1009 с.

6. Asaduzzaman, A. Performance-power analysis of H.265/HEVC and H.264/AVC running on multicore cache systems [Электронный ресурс] / A. Asaduzzaman, V. R. Suryanarayana, M. Rahman // Intelligent Signal Processing and Communications Systems. — Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/6704542 (дата обращения 01.02.19).

7. Sedgewick, R. Algorithms. Fourth edition / R. Sedgewick, K. Wayne. — Upper Saddle River : Addison-Wesley, 2016. — 960 p.

8. Introduction to Algorithms / T. H. Cormen [et al.]. — 3rd edition. — Cambridge ; London : The MIT Press, 2009. — 1296 p.

9. Welch, W. J. Algorithmic complexity: three NP — hard problems in computation all statistics / W. J. Welch // Journal of Statistical Computation and Simulation. — 1982. — Vol. 15, № 1. — P. 17–25.

10. High efficiency video coding [Электронный ресурс] / Fraunhofer Heinrich Hertz Institute. — Режим доступа: http://hevc.info/ (дата обращения: 01.02.19).

11. Sze, V. Parallelization of CABAC transform coefficient coding for HEVC [Электронный ресурс] / V. Sze, M. Budagavi // Semantic Scholar / Allen Institute for Artificial Intelligence Logo. — Режим доступа: https://www.semanticscholar.org/paper/Parallelization-of-CABAC-transform-coefficient-for-SzeBudagavi/0653a22ff7b82bdd0130cea8b597a7024ab46882 (дата обращения: 01.02.19).

12. Salomon. D. Handbook of data compression / D. Salomon, G. Motta. — London ; Dordrecht ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 2010. — 1360 p.

13. Anderson, S. E. Bit Twiddling Hacks [Электронный ресурс] / S. E. Anderson. — Режим доступа: https://graphics.stanford.edu/~seander/bithacks.html (дата обращения 01.02.19).

14. Гервич, Л. Р. Программирование экзафлопсных систем / Л. Р. Гервич, Б. Я. Штейнберг, М. В. Юрушкин // Открытые системы. СУБД. — 2013. — Т. 8.— С. 26–29.

15. Уоррен-мл., Г. С. Алгоритмические трюки для программистов / Г.-С. Уоррен- мл. — 2-е изд. — Москва : Вильямс, 2013. — 512 с.

Поступила в редакцию 02.11.2018
Сдана в редакцию 03.11.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 02.11.2018
Submitted 03.11.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторе:

Арзуманян Роман Вадимович,
аспирант кафедры «Интеллектуальные многопроцессорные системы» Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (РФ, 347922, Ростовская обл., Таганрог, ул. Чехова, 22),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3370-5093
roman.arzum@gmail.com

Author:

Arzumanyan, Roman V.,
postgraduate of the Intelligent Multiprocessor Systems Department, Institute of Computer Technology and Information Security, Southern Federal University (22, ul. Chekhova, Taganrog, Rostov Region, 347922, RF),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3370-5093
roman.arzum@gmail.com

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 62-50 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-93-100

Способ терминального управления на участке выведения беспилотного летательного аппарата с баллистической фазой полета*

Н. Я. Половинчук[1], С. В. Иванов[2], М. Ю. Жукова[3], Д. Г. Белоножко[4]**
[1] Ростовский филиал московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2,4] Краснодарское высшее военное училище им. С. М. Штеменко, г. Краснодар, Российская Федерация
[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Method of terminal control in ascent segment of unmanned aerial vehicle with ballistic phase ***

N. Y. Polovinchuk[1], S. V. Ivanov[2], M. Y. Zhukova[3], D. G. Belonozhko[4] **
[1] Moscow State Technical University of Civil Aviation, Rostov Branch, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2,4] Krasnodar Higher Military School named after army general S. M. Shtemenko, Krasnodar, Russian Federation
[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена решению задачи синтеза управления движением центра масс (задача наведения) беспилотного летательного аппарата (БЛА) с большой дальностью полета на разгонном участке. Условие управления: оптимальный расход топлива. Для решения задачи используется принцип динамического программирования с учетом ограничений на модуль вектора тяги двигателя. Реализация терминального наведения требует формирования управления как функции состояния объекта в конце участка выведения. Достижение этих граничных условий определяет дальнейший переход к баллистической фазе полета.
Материалы и методы. Принцип динамического программирования Беллмана является наиболее рациональным с точки зрения реализуемости эффективных в вычислительном отношении бортовых алгоритмов и решения задачи в форме синтеза. При естественной ограниченности величины тяги и энергетических ресурсов на борту данный принцип позволяет получить решения, не содержащие функции переключения. Оптимальное управление в этом случае является гладкой функцией (без разрыва производной) текущих и конечных параметров БЛА.
Результаты исследования. Разработан новый алгоритмический способ синтеза терминального управления движения. Его отличие в том, что управление движением БЛА на разгонном участке траектории формируется функцией текущих и конечных параметров движения. Таким образом обеспечивается движение по энергетически оптимальной траектории в заданную область пространства. Результаты решения задачи позволяют строить замкнутые алгоритмы терминального наведения для разгонного участка траектории БЛА с большой дальностью полета. Такие алгоритмы обладают хорошей сходимостью и точностью выведения за счет

Introduction. The solution to the problem on the centroidal motion control synthesis (guidance problem) of an unmanned aerial vehicle (UAV) with long-range capabilities in the boost phase is considered. Control condition requires optimum fuel consumption. The principle of dynamic programming considering the restrictions to the vector modulus of the thrust output is used to solve the problem. The implementation of terminal guidance requires the formation of control as a function of the object state at the end of the ascent phase. The attainment of these boundary conditions determines the further transition to the ballistic flight phase.
Materials and Methods. Bellman's principle of dynamic programming is the most reasonable from the point of view of the implementability of the computationally efficient on-board algorithms and the solution to the problems in the form of synthesis. With natural scarcity of thrust and energy resources on board, this principle enables to obtain solutions free from the switching functions. In this case, the optimal control is a smooth function (without derivative discontinuity) of the current and final parameters of the UAV.
Research Results. A new algorithmic method for the synthesis of terminal motion control is developed. Its difference is that the UAV movement control in the ascent phase is formed by the function of the motion actual and terminal parameters. This ensures movement along an energetically optimal trajectory into the given region of space. The problem solution results enable to build closed terminal guidance algorithms for the boost phase of the UAV trajectory with long-range capabilities. Such algorithms have good convergence and injection accuracy due to the prediction of parameters during



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: npolovinchuk@mail.ru, sta399@yandex.ru, marg88@list.ru, staeer@rambler.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

прогнозирования параметров в процессе полета на сокращающемся интервале времени.
Обсуждение и заключения. Наиболее предпочтительным представляется принцип динамического программирования. Именно его следует использовать при решении задачи синтеза оптимального по расходу топлива управления движением центра масс (задача наведения) БЛА с большой дальностью полета на разгонном участке.

the flight at a shorter time interval.
Discussion and Conclusions. The most preferred is the principle of dynamic programming. It should be used when solving the problem on the centroidal motion control synthesis (guidance problem) of the UAV with long-range capabilities in the boost phase.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БЛА), терминальное наведение, направляющие косинусы, угол тангажа, угол атаки, граничные условия, разгонный участок, баллистическая фаза полета.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), terminal guidance, direction cosines, pitching angle, angle of attack, boundary conditions, boost phase, ballistic flight phase.

Образец для цитирования: Способ терминального управления на участке выведения беспилотного летательного аппарата с баллистической фазой полета / Н. Я. Половинчук [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 1. — С. 93-100. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-93-100

For citation: N.Y. Polovinchuk, et al. Method of terminal control in ascent segment of unmanned aerial vehicle with ballistic phase. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 93-100. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-93-100

Введение. В настоящее время возможности и сфера применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) существенно возросли. В первую очередь это связано с увеличением дальностью полета БЛА. В аппаратах с баллистической фазой полета необходимо предусмотреть возможность управления на различных участках, в том числе на разгонном участке выведения БЛА в заданную область. Для формирования управления целесообразно использовать принцип терминального наведения. При этом управление должно формироваться как функция конечных параметров движения, а не функция времени.

Решению этой проблемы посвящены многие публикации, однако описанная выше задача сохраняет актуальность. В частности, представляет интерес разработка высокоэффективных в вычислительном отношении алгоритмических способов терминального наведения. При этом следует учитывать указанные особенности, универсальные для различных типов средств выведения. Они обладают свойствами адаптации и в определенном смысле удовлетворяют требованиям оптимальности.

С точки зрения задачи наведения особый смысл имеет такое управление, при котором используется минимальное количество топлива. Синтез оптимального управления базируется на применении метода динамического программирования Беллмана [1].

Материалы и методы. Решение задачи синтеза оптимального управления движением БЛА на разгонном участке активного полета исследовалось во многих работах. Однако полученное в большинстве случаев решение оптимального управления сводится к реализации временной или параметрической программы. Будем решать задачу поиска оптимального управления на участке выведения БЛА в следующей постановке. Известными являются параметры движения БЛА как координаты X_0, Y_0, Z_0 текущей точки траектории, получаемые за счет решения задачи навигации. Параметры конечной точки $X_к$, $Y_к$, $Z_к$ удовлетворяют граничному состоянию, фиксирующему переход к баллистической фазе полета, определяемой гиперповерхностью в фазовом пространстве. Условию $S_k(X_к, Y_к, Z_к) = 0$ удовлетворяет целое множество конечных параметров. Требуется синтезировать оптимальное управление в задаче наведения БЛА, которая обеспечивает его перевод из начального состояния на гиперповерхность конечных условий.

В качестве критерия оптимальности принимается количество израсходованного на разгонном участке топлива:

$$m(t) = \int_0^t \dot{m}(t)dt \,, \tag{1}$$

где $\dot{m}(t)$ — секундовый массовый расход топлива.

В качестве математической модели движения центра масс принимается следующая система дифференциальных уравнений:

$$\dot{\bar{\mathrm{R}}}(\mathrm{t}) = \bar{\mathrm{V}}(\mathrm{t}) \,, \tag{2}$$

$$V(t) = \dot{W}(t)\bar{E}_w(t) + \bar{g}(\bar{r}) \,,$$

где $\bar{R}(t)$ — радиус-вектор, $\bar{g}(\bar{r})$ — вектор силы притяжения Земли, $\dot{W}(t)$ — модуль вектора управляющего

ускорения.

Модуль вектора управляющего ускорения $\dot{W}(t)$ является заданной функцией времени и определяется характеристиками двигателя БЛА. Неизвестным является единичный вектор управляющего ускорения $\bar{E}_w(t)$. При решении задачи оптимизации он будет определять требуемые свойства управляемого движения БЛА на разгонном участке. Нет необходимости в регулировании величины вектора тяги (в известном смысле это величина кажущегося ускорения $\dot{W}(t)$). Более рациональный подход — максимизация этой величины для применяемого на разгонной ступени носителя двигателя. Это позволяет применить полученные решения и для случая использования твердотопливных двигателей. Характеристики двигателя БЛА являются достаточно стабильными, и при постоянном секундном расходе топлива $\dot{m}(t) = const$ оптимальность управления определяется продолжительностью активного участка полета. В этом случае функционал (1) будет функцией верхнего предела интегрирования. Таким образом, задача минимизации количества топлива превращается в эквивалентную задачу минимизации продолжительности полета, а критерием оптимальности будет быстродействие. Задача синтеза заключается в нахождении ориентации вектора тяги двигателя БЛА, которая определяется направляющими косинусами вектора тяги $\bar{P}(t)$ как функции текущих параметров и конечного состояния.

Сделаем два допущения. Первое. Поскольку большая часть разгонного участка лежит за пределами плотных слоев атмосферы, не будем учитывать как ограничение угловую скорость изменения вектора тяги в пространстве (продольной оси БЛА). Второе. Движение БЛА будем считать проходящим в определяемой заранее плоскости.

Конечное состояние БЛА для перехода к баллистической фазе полета фиксируется выполнением следующего граничного условия [2]:

$$\begin{gathered} S_{1k} = \left(V_{xk} y_k - x_k V_{yk}\right)\left[V_{xk}\left(y_k - y_ц\right) - V_{yk}\left(x_k - x_ц\right)\right] - \\ -\pi_0\left(x_ц^2 + y_ц^2\right)^{1/2}\left[1 - \frac{x_k x_ц + y_k y_ц}{\left(x_ц^2 + y_ц^2\right)^{1/2}\left(x_k^2 + y_k^2\right)^{1/2}}\right] = 0. \end{gathered} \tag{3}$$

Здесь $x_k, y_k, x_ц, y_ц$ — соответственно координаты начальной точки и точки начала функционирования БЛА на заключительном участке траектории. Величина текущего значения граничного условия $S_{1k}(t_0)$ является мерой невыполнения условия (3). Математическая запись этого условия соответствует гиперповерхности, которая является гладкой функцией фазовых координат и описывает все семейство возможных траекторий выведения БЛА [2].

Граничные условия заданы для центрального поля притяжения. Уравнения движения БЛА для этого случая будут иметь следующий вид:

$$\begin{gathered} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{\pi_0}{r^3}x_1 + \frac{1}{m}P\cos\alpha_1, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = -\frac{\pi_0}{r^3}x_3 + \frac{1}{m}P\cos\alpha_2. \end{gathered} \tag{4}$$

Здесь $\pi_0 = f \cdot M_з$ — постоянная центрального поля притяжения Земли, равная произведению гравитационной постоянной f на массу Земли $M_з$; $r = (x_1^2 + x_3^2)^{1/2}, x_1 = x, x_2 = V_x, x_3 = y, x_4 = V_y$; P — величина вектора тяги; X_A — аэродинамическая сила лобового сопротивления; Y_A — аэродинамическая подъемная сила.

Поскольку БЛА снабжается двигателем с управляемым вектором тяги, то его ориентацию будут определять направляющие косинусы. В этом случае ограничение на управления будет определяться соотношением:

$$\left\|\bar{P}(t)\right\| = \left\{\left[P(t)\cos\alpha_1(t)\right]^2 + \left[P(t)\cos\alpha_2(t)\right]^2\right\}^{1/2} \le \left|\bar{P}^0(t)\right|. \tag{5}$$

Ограничение на управления (5) является «ограничением по гиперсфере». Из этого следует решение, при котором оптимальное управление не является кусочно-постоянным, без переключений. В этом случае оптимальная по быстродействию траектория выведения в фазовом пространстве не имеет «углов» и разрывов производной. Оптимальное по критерию быстродействия управление будет представлять собой нелинейную, непрерывную функцию граничных условий (3) [3].

Задача синтеза формулируется следующим образом. Объект управления из произвольного текущего состояния, принимаемого за начальное и определяемого текущим значением S_{1k} в момент t_0, переводится на гиперповерхность граничного условия $S_{1k} = 0$ в момент t_k. При этом учитывается ограничение на величину

управляющего ускорения (модуля тяги двигателя). Требуется найти оптимальное управление в форме синтеза, которое обеспечивает такой перевод за минимальное время.

Состояние объекта в конечный момент удовлетворяет граничному условию $S_{ik}[X(t_k)]=0$ и определяет момент перехода к баллистической фазе полета.

В соответствии с принципом динамического программирования Р. Беллмана [4] необходимым и достаточным условием оптимальности для сформулированной задачи будет соотношение:

$$\min_{u\in U}\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial T^0}{\partial x_i}f_i(\bar{x},\bar{u})\right]=-1\,. \tag{6}$$

С учетом математической модели объекта, заданной системой (4), уравнение динамического программирования [4] с учетом критерия оптимальности определяется соотношением

$$\min_{u\in U}\left[x_2\frac{\partial T^0}{\partial x_1}-\left(\frac{\pi_0}{r^3}x_1-\frac{1}{m}P_x\right)\frac{\partial T^0}{\partial x_2}+x_4\frac{\partial T^0}{\partial x_3}-\left(\frac{\pi_0}{r^3}x_3-\frac{1}{m}P_y\right)\frac{\partial T^0}{\partial x_4}\right]=-1\,, \tag{7}$$

где $P_x=P\cos\alpha_1, P_y=P\cos\alpha_2$.

В соответствии с методологией динамического программирования Р. Беллмана, операция минимизации может быть проведена на основе применения к соотношению (5) неравенства Шварца [3]. Это позволит существенно упростить решение задачи оптимизации. Тогда выражение (7) с учетом неравенства (5) будет определяться соотношением

$$\min_{u\in U}\left(\frac{1}{m}P_x\frac{\partial T^0}{\partial x_2}+\frac{1}{m}P_y\frac{\partial T^0}{\partial x_4}\right)=-P^0(t)\left[\left(\frac{1}{m}\frac{\partial T^0}{\partial x_2}\right)^2+\left(\frac{1}{m}\frac{\partial T^0}{\partial x_4}\right)^2\right]^{1/2}. \tag{8}$$

В этом случае уравнение Гамильтона — Якоби будет представлено так:

$$\begin{aligned}&x_2\frac{\partial T^0}{\partial x_1}-\frac{\pi_0}{r^3}x_1+x_4\frac{\partial T^0}{\partial x_3}-\frac{\pi_0}{r^3}x_3-P^0(t)\times\\&\times\left[\left(\frac{1}{m}\frac{\partial T^0}{\partial x_2}\right)^2+\left(\frac{1}{m}\frac{\partial T^0}{\partial x_4}\right)^2\right]^{1/2}=-1.\end{aligned} \tag{9}$$

Уравнение (9) решается с учетом заданного граничного условия:
$T^0(x_1,x_2,x_3,x_4)=0,$ при

$$(x_1,x_2,x_3,x_4)\in S^*_{1k}\,. \tag{10}$$

Вычисление частных производных величины S по фазовым переменным x_1,x_2,x_3,x_4 дает следующие зависимости:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial S^0}{\partial x_1}=\left(-2x_2x_3x_4+x_2x_4x_{3ц}+2x_4^2x_1-x_4^2x_{1ц}\right),\\&\frac{\partial S^0}{\partial x_2}=\left(2x_3^2x_2-2x_1x_4x_3-2x_2x_3x_{3ц}+x_1x_4x_{3ц}+x_4x_3x_{1ц}\right),\\&\frac{\partial S^0}{\partial x_3}=\left(2x_2^2x_3-2x_2x_4x_1-x_2^2x_{3ц}-x_2x_4x_{1ц}\right),\\&\frac{\partial S^0}{\partial x_4}=\left(2x_1^2x_4-2x_1x_2x_3+2x_4x_1x_{1ц}+x_2x_3x_{3ц}+x_2x_3x_{1ц}\right).\end{aligned} \tag{11}$$

Подставляя соотношения (11) в (9) и выполняя несложные преобразования, получаем зависимость:

$$\begin{aligned}&\{\frac{\pi_0}{r^3}(x_1-x_3)-2x_2x_4^2x_{1ц}-\frac{P^0}{m}\times\\&\times[\left(2x_3^2x_2-2x_1x_4x_3-2x_2x_3x_{3ц}+x_1x_4x_{3ц}+x_4x_3x_{1ц}\right)^2+\\&+\left(2x_1^2x_4-2x_1x_2x_3+2x_4x_1x_{1ц}+x_2x_3x_{3ц}+x_2x_3x_{1ц}\right)^2]^{1/2}\}\frac{\partial T^0}{\partial S_1}=-1\end{aligned} \tag{12}$$

с граничными условиями

$$T^0(S_1)=0,\ при\ (x_1,x_2,x_3,x_4)\in S^*_{1k}\,. \tag{13}$$

Выражение в фигурных скобках в (12), обозначенное через $S'(x_i)$, можно записать в компактной форме:

$$S'(x_i)\cdot\frac{\partial T^0}{\partial S_1}=-1. \qquad (14)$$

Уравнение (14) с граничными условиями (13) можно решить различными способами, например методом характеристик [5]. Однако более рационально использовать следующую методику.

Выражение (11) определяет структуру оптимального управления [6]:

$$\begin{aligned}\bar{P}_{opt}(\bar{x})&=-PE^{onm}(\bar{x}),\\ \dot{\bar{W}}^{onm}(\bar{x})&=-\dot{W}E^{onm}(\bar{x}),\end{aligned} \qquad (15)$$

где $E(\bar{x})$ — единичный вектор тяги.

Соотношение (15) в скалярном виде:

$$\begin{aligned}P_x^{opt}&=P\cos\alpha_1,\\ P_y^{opt}&=P\cos\alpha_2,\end{aligned} \qquad (16)$$

$$\begin{aligned}\cos\alpha_1&=\frac{\dfrac{\partial T^0}{\partial x_2}}{\left[\left(\dfrac{\partial T^0}{\partial x_2}\right)^2+\left(\dfrac{\partial T^0}{\partial x_4}\right)^2\right]^{1/2}},\\ \cos\alpha_2&=\frac{\dfrac{\partial T^0}{\partial x_4}}{\left[\left(\dfrac{\partial T^0}{\partial x_2}\right)^2+\left(\dfrac{\partial T^0}{\partial x_4}\right)^2\right]^{1/2}}.\end{aligned} \qquad (17)$$

Уравнение (9) и соотношения (17) могут быть преобразованы к более удобному виду по следующим соображениям. Исходя из условий формирования множества возмущенных траекторий, за счет варьирования управления можно построить в фазовом пространстве гиперповерхность с равным временем выведения, то есть изохронную поверхность. Действительно, для каждой из точек фазовой траектории будем вычислять значение критерия оптимальности: $J(t_1), J(t_2), \dots, J(t_k)$.

Таким образом, получим совокупность траекторий для каждого $t\in[t_н, t_k]$. В силу непрерывности зависимости $x(t)$ и J от изменяемого управления, множество траекторий образует поверхность в фазовом пространстве X. Эта граничная поверхность, образованная множеством векторов $x[t_i, J(t_i)]$, является выпуклой и гладкой. Для условий перехода к баллистической фазе полета изохронная поверхность имеет точку касания с гиперповерхностью граничных условий.

При качественной реализации оптимального управления будет уменьшаться расстояние в фазовом пространстве между гиперповерхностью граничных условий $S_k = 0$ и изохронной поверхностью $T(x, R_ц, t) = 0$. В некоторое время у двух поверхностей окажется общая точка (рис. 1).

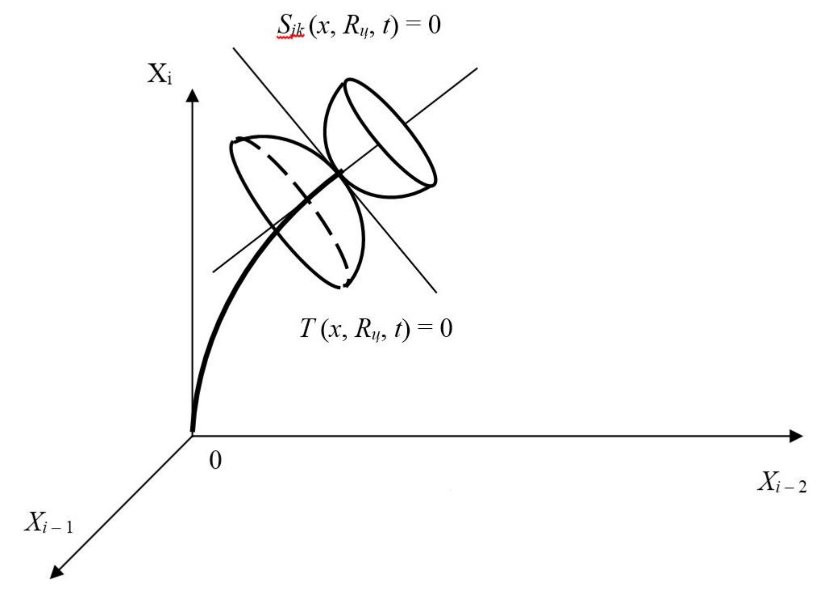


Рис. 1. Геометрическая интерпретация гиперповерхностей в фазовом пространстве при наведении на разгонном участке траектории

В точке S_k и T^0 они имеют общую касательную, то есть их градиенты в фазовом пространстве совпадают. Таким образом:

— отмечается существование оптимальной траектории $x_{opt}(t)$ и оптимального управления $u_{opt}(t)$;

— определяется окончание разгонного участка траектории ($t = t_k$) и переход к баллистической фазе полета.

В точке касания изохронная поверхность и гиперповерхность граничных условий имеют общую касательную и нормаль. Математически условие существования общей нормали определяется выражением [2]:

$$\left\{\frac{\partial T^0}{\partial x_i}\right\} = A\left\{\frac{\partial S_{ik}}{\partial x_i}\right\}, \qquad (18)$$

где A — константа, определяемая из анализа выпуклости обеих гиперповерхностей.

На основании соотношений (11) и (18) преобразуем (17). Получим выражение для направляющих косинусов вектора тяги в функции текущих и конечных параметров движения:

$$A = \frac{\left(-2x_2x_3x_4 + x_2x_4x_{3ц} + 2x_4^2x_1 - x_4^2x_{1ц}\right)}{\left[\left(-2x_2x_3x_4 + x_2x_4x_{3ц} + 2x_4^2x_1 - x_4^2x_{1ц}\right)^2 + \left(2x_4x_1^2 - 2x_1x_2x_3 + 2x_1x_4x_{1ц} + x_2x_3x_{3ц} + x_2x_3x_{1ц}\right)^2\right]^{1/2}}, \qquad (19)$$

$$B = \frac{\left(2x_1^2x_4 - 2x_2x_1x_3 + 2x_4x_1x_{1ц} + x_2x_3x_{3ц} + x_2x_3x_{1ц}\right)}{\left[\left(-2x_2x_3x_4 + x_2x_4x_{3ц} + 2x_4^2x_1 - x_4^2x_{1ц}\right)^2 + \left(2x_4x_1^2 - 2x_1x_2x_3 + 2x_1x_4x_{1ц} + x_2x_3x_{3ц} + x_2x_3x_{1ц}\right)^2\right]^{1/2}}, \qquad (20)$$

где $A = \cos\alpha_1$, $B = \cos\alpha_2$.

Из соотношений (19), (20) легко получить естественный для данного типа БЛА параметр для определения ориентации вектора управляющего ускорения (в известном смысле вектора тяги) — угол тангажа:

$$\vartheta(S) = arctg\frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1} = \frac{\left(2x_1^2x_4 - 2x_2x_1x_3 + 2x_4x_1x_{1ц} + x_2x_3x_{3ц} + x_2x_3x_{1ц}\right)}{\left(-2x_2x_3x_4 + x_2x_4x_{3ц} + 2x_4^2x_1 - x_4^2x_{1ц}\right)}. \qquad (21)$$

В нашем случае движение БЛА проходит в заданной плоскости и угол рыскания $\varphi(S) = 0$. С использованием предложенной методики синтеза терминального оптимального управления был разработан алгоритм расчета угла тангажа [2] и проведено моделирование полета БЛА на ЭВМ [7].

Результаты исследования. Численные исследования проводились с использованием программного обеспечения, реализующего предложенный способ. Речь идет об алгоритмическом программном обеспечении терминального наведения баллистических летательных аппаратов на основе решения краевых задач баллистики. Соответствующая программа для ЭВМ зарегистрирована в 2013 году.

При моделировании использовалось гипотетическое разгонное средство с характеристиками и начальными условиями выведения БЛА, приведенными в [8].

Начальные условия при моделировании и результаты расчетов начального участка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Начальные условия выведения БЛА

t	x/vx	y/vy	z/vz	wx/tang	wy/tet	w1/alf
0,0000	0,0 5,6323	0,0 –0,0000	0,0 322,6757	0,0000 90,00	0,0000 0,00	0,0000 0,000
0,5537	3,1 5,6323	3,1 11,1626	178,7 322,6756	–0,0000 90,00	16,6000 1,98	16,6000 –0,048
3,4580	34,7 21,4565	120,9 69,4705	1115,8 322,6727	15,8242 69,34	103,4286 12,13	105,3386 –7,881
13,0193	832,4 155,6274	1683,4 259,0827	4200,8 322,6335	150,0000 60,00	386,9131 35,91	419,3209 0,011
23,0193	3384,5 368,3725	5300,4 464,9493	7426,8 322,5441	362,7748 50,02	690,8797 43,59	790,8281 –2,076
33,0193	8469,9 662,2567	11009,1 679,2317	10651,6 322,4053	656,7462 43,44	1003,1187 42,79	1219,9140 –2,582
43,0193	16923,8 1044,7345	18956,0 915,1428	13874,7 322,2176	1039,4134 38,74	1336,7768 40,11	1727,7590 –2,677
50,9898	26729,1 1429,1498	27089,4 1131,2610	16442,2 322,0334	1424,0909 36,01	1630,6058 37,94	2211,8627 –2,501

График изменения угла тангажа на разгонном участке полета показан на рис. 2.

Рис. 2. Изменение угла тангажа и угла входа БЛА в атмосферу

Ниже перечислены более полные результаты моделирования, приведенные в [8].

1. Полученное управление является субоптимальным вследствие использования граничных условий в аналитическом виде. Для повышения точности граничных условий в алгоритм навигации необходимо ввести алгоритм его коррекции, основанный на привлечении более точных моделей гравитационного поля Земли. Таким образом повышается точность выведения.

2. Влияние случайных возмущений компенсируется адаптивными свойствами терминального наведения, а также прогнозированием параметров движения и формирования управления на уменьшающийся каждый раз интервал времени до момента окончания процесса выведения.

3. Полученные оценки при моделировании позволили рационально выбрать дискретность алгоритмов навигации и наведения и тем самым ограничить диапазон требований к бортовым ЭВМ при его реализации.

4. Не вызывает затруднений реализуемость алгоритмов наведения на основе разработанной методики на современных бортовых ЭВМ. Требуемое быстродействие составляет $(1–1,5)\times10^6$ к.о./с.

Обсуждение и заключения. Таким образом, наиболее предпочтительным представляется принцип динамического программирования. Именно его следует использовать при решении задачи синтеза оптимального по расходу топлива управления движением центра масс (задача наведения) БЛА с большой дальностью полета на разгонном участке.

Известное замечание по применимости динамического программирования, так называемое «проклятие размерности», неуместно в задаче формирования управления как функции конечного состояния [5]. Кроме того, использование граничных условий в аналитическом виде существенно упрощает формирование субоптимального управления и позволяет оперативно менять задачи полета. Это существенно расширяет возможность применения названного алгоритма для БЛА различного назначения.

Библиографический список

1. Половинчук, Н. Я. Проектирование систем управления ракет-носителей и межконтинентальных баллистических ракет / Н. Я. Половинчук, А. А. Ардашов. — Ростов-на-Дону : РВИРВ, 2010. — 242 с.
2. Могилевский, В. Д. Наведение баллистических летательных аппаратов / В. Д. Могилевский. — Москва : Машиностроение, 1976. — 208 с.
3. Атанс, М. Оптимальное управление / М. Атанс, П. Фалб. — Москва : Машиностроение, 1968. — 764 с.
4. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. — Москва : Мир, 1965. — 286 с.
5. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-Ши. — Москва : Мир, 1972. — 544 с.
6. Бортовые терминальные системы управления / Б. Н. Петров [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1983. — 200 с.
7. Половинчук, Н. Я. Методы и алгоритмы терминального управления движением летательных аппаратов / Н. Я. Половинчук, И. В. Щербань. — Москва : Ред.-изд. центр МО РФ, 2004. — 290 с.
8. Половинчук, Н. Я. Синтез управления маневром уклонения беспилотным летательным аппаратом с учетом терминальных ограничений / Н. Я. Половинчук, С. В. Иванов, Л. И. Котельницкая // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 2 — С. 190–200.

Поступила в редакцию 22.09.2018
Сдана в редакцию 24.09.2018
Запланирована в номер 15.01.2019

Received 22.09.2018
Submitted 24.09.2018
Scheduled in the issue 15.01.2019

Об авторах:

Половинчук Николай Яковлевич,
профессор кафедры «Авиационные электросистемы и пилотажно-навигационные комплексы» Ростовского филиала Московского государственного технического университета гражданской авиации (РФ, 344029, Ростов-на-Дону, пр. Шолохова, 262), кандидат технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0002-5120
npolovinchuk@mail.ru

Иванов Станислав Валерьевич,
доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3237-0415
sta399@yandex.ru

Жукова Мария Юрьевна,
аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9555-3756
marg88@list.ru

Белоножко Дмитрий Григорьевич,
адъюнкт Краснодарского высшего военного училища им. С. М. Штеменко (РФ, 350035, г. Краснодар, ул. Красина, 4),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7185-9475
staeer@rambler.ru

Authors:

Polovinchuk, Nikolay Y.,
professor of the Airborne Electrical Systems and Navigation Instrumentation Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Rostov Branch (262c, Sholokhov pr., Rostov-on-Don, RF), Cand.Sci. (Eng.), professor ,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0002-5120
npolovinchuk@mail.ru

Ivanov, Stanislav V.,
associate professor of the Production Automation Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3237-0415
sta399@yandex.ru

Zhukova, Maria Y.,
postgraduate of the Computer and Automated Systems Software Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9555-3756
marg88@list.ru

Belonozhko, Dmitry G.,
adjunct, Krasnodar Higher Military School named after army general S. M. Shtemenko (4, ul. Krasina, Krasnodar, 350035, RF),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7185-9475
staeer@rambler.ru